
MÔNICA BUFFARA CECATO STOCCO

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE APLICAÇÃO DE ÓLEOS VEGETAIS COMO
FLUIDOS ISOLANTES EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO DA REDE
ELÉTRICA**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre.
Área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Profª Drª Helena M. Wilhelm

CURITIBA

2009



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais- PIPE
Setor de Tecnologia

RELATÓRIO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos vinte e sete dias do mês de outubro de 2009, no Auditório do CEHPAR - no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pelo Prof. Dr. Dante Homero Mosca Jr., coordenador do PIPE -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, a Banca Examinadora para a centésima septuagésima segunda defesa de dissertação de mestrado na área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais. Estiveram presentes no ato, além do coordenador do Curso de Pós-Graduação, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia, foi constituída pelos professores doutores: Helena M. Wilhelm (UFPR), Kleber Franke Portella (UFPR), Simoni Margareti Plentz Meneghetti (UFAL). Às 14:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando o candidato **MÔNICA BUFFARA CECATO STOCCO** a fazer a apresentação da dissertação de mestrado intitulada **“APLICAÇÃO DE ÓLEOS VEGETAIS COMO FLUIDOS ISOLANTES EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO DA REDE ELÉTRICA”**. Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes. Tendo em vista a dissertação e a arguição, a banca decidiu pela APROVAÇÃO do candidato, (de acordo com a determinação dos artigos 62 e 63 da resolução 62/03 de 22.07.2003).

Curitiba, 27 de outubro de 2009.

Prof. Dr.ª Helena M. Wilhelm
Orientador

Prof. Dr. Kleber Franke-Portella
Examinador

Prof. Dr. Simoni Margareti Plentz
Meneghetti
Examinador

***“O saber se aprende com os mestres.
A sabedoria, só com o corriqueiro da
vida.”***

**Cora Coralina
(1889 – 1985)**

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser realizado sem o apoio de algumas pessoas que são muito importantes para mim. Algumas me ajudaram na execução deste, com conhecimento técnico e trabalho árduo, outros me ajudaram a ser o que sou hoje, me ensinado valores e prioridades de vida. Assim, gostaria de deixar impresso aqui, meu profundo agradecimento a vocês.

Ao meu pai Edson Cecato, a quem segui os passos tornando-me Engenheira Química, e a minha mãe, Marília Buffara Cecato, os mais profundos agradecimentos por tudo o que fizeram e fazem por mim e pela sólida formação que me deram.

Ao meu marido e colega de trabalho Guilherme Barrachina Stocco, que é muito responsável por esta dissertação com suas sugestões e ensinamentos e que me deu muita ajuda profissional e emocional neste período. Meu companheiro de longa data que sempre dispõe do apoio que eu preciso.

Ao meu filho Arthur Cecato Stocco, que foi gerado e nasceu durante esta jornada e hoje é a razão da minha vida e me fez conhecer o amor incondicional, o que mudou a minha maneira de ver o mundo.

À Dra. Helena Maria Wilhelm, minha orientadora, pela disponibilidade revelada ao longo destes anos e pelas críticas e sugestões relevantes feitas durante a orientação.

Ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), por dar-me a oportunidade de participar deste projeto, proporcionando-me bolsa para custear os meus estudos de mestrado, fato fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do LACTEC Luciane Túlio, Cherryl Ladd Moreira dos Santos, Leandro Gonçalves Feitosa, Suely Monteiro de Oliveira e Marcelo Ravaglio, pelos ensinamentos e ensaios realizados e pela “cobertura”, sem a qual este trabalho não se realizaria, no período que eu estava grávida e de resguardo.

Aos demais colegas do LACTEC, pela realização de todos os ensaios necessários para o desenvolvimento desta pesquisa.

À Companhia Paranaense de Distribuição Elétrica (COPEL), pelo subsídio financeiro que pode proporcionar esta pesquisa de extensão.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais (PIPE) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) por ofertar um curso abrangente que permitiu desenvolver uma pesquisa prática e inovadora no setor elétrico nacional.

E a todos aqueles que, embora não nomeados, me brindaram com seus inestimáveis apoios em distintos momentos, o meu reconhecido e carinhoso muito obrigada!

SUMÁRIO

Agradecimentos	IV
Sumário	VI
Lista de Tabelas	IX
Lista de Figuras	XI
Lista de Símbolos, Abreviaturas e Unidades	XV
Resumo	XVIII
Abstract	XX
1. Considerações Iniciais	1
1.1. Características da Pesquisa	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo Geral	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Trabalhos Resultantes da Pesquisa Realizada	3
1.4 Importância da Pesquisa	4
2. Introdução	6
2.1 Revisão Bibliográfica	8
2.1.1 Energia Elétrica	8
2.1.2 Transformadores de Distribuição	9
2.1.3 Fluidos Isolantes para Transformadores	12
2.1.3.1 Óleo Mineral Isolante (OMI)	13
2.1.3.2 Óleo Vegetal Isolante (OVI)	22
2.1.3.3 Aditivos Antioxidantes para Óleos Vegetais	33
2.1.3.4 Especificações Técnicas dos Óleos Isolantes	35

2.1.4 Papel Isolante Elétrico	40
3. Procedimento Experimental	47
3.1 Descrição dos Materiais Utilizados	47
3.2 Caracterização Físico-Química dos Diferentes Óleos Utilizados	47
3.3 Ensaio de Envelhecimento Acelerado, em Escala Laboratorial, dos Diferentes Óleos Utilizados.....	48
3.4 Avaliação de Aditivos na Estabilidade Térmica e Oxidativa dos Óleos Vegetais OV-1, OV-2 E OV-3.....	49
3.5 Ensaio de Envelhecimento Acelerado do Papel Kraft Isolante nos Diferentes Óleos	51
3.6 Avaliação da Formação de Gases Dissolvidos nos Diferentes Óleos após Aplicação de Diferentes Cargas de Esforço Elétrico.....	53
3.7 Realização de Ensaio Elétricos em Transformadores de Distribuição Preenchidos com os Diferentes Óleos.....	55
3.7.1 Ensaio de Elevação de Temperatura	56
3.7.2 Medição de Tensão de Rádio Interferência	57
3.7.3 Medição do Fator de Potência do Isolamento.....	57
3.7.4 Ensaio de Impulso Atmosférico.....	57
3.7.5 Ensaio de Tensão Aplicada	58
3.7.6 Ensaio de Tensão Induzida.....	58
3.8 Avaliação da Suportabilidade Dielétrica de Transformadores Isolados com os Óleos OV-1, OV-2 E OV-3	58
4. Resultados e Discussão	60
4.1 Caracterização Físico-Química dos Óleos Isolantes.....	60

4.1.1 Caracterização Físico-Química do OMI	60
4.1.2 Caracterização Físico-Química dos Óleos Vegetais	61
4.1.3 Caracterização do Papel Kraft Isolante	63
4.2 Ensaio de Envelhecimento Acelerado dos Óleos em Escala Laboratorial	64
4.3 Avaliação de Aditivos na Estabilidade Térmica dos Óleos Vegetais OV-1, OV-2 E OV-3	66
4.4 Ensaio De Envelhecimento Simulado Do Papel Isolante Nos Diferentes Óleos	71
4.5 Avaliação da Formação de Gases Dissolvidos	78
4.6 Utilização dos Diferentes Óleos em Transformadores de Distribuição	83
4.6.1 Ensaio de Medição de Perdas e de Elevação de Temperatura nos Transformadores de Distribuição	84
4.6.2 Medição de Resistência de Isolamento	85
4.6.3 Medição de Tensão de Rádio Interferência	86
4.6.4 Medição do Fator de Potência do Isolamento	86
4.6.5 Ensaio de Impulso Atmosférico	86
4.6.6 Ensaio de Tensão Aplicada	90
4.6.7 Ensaio de Tensão Induzida	90
4.7 Avaliação da Influência do Óleo sobre a Suportabilidade Dielétrica do Transformador	91
5. Conclusões	93
5.1. Sugestões para Continuidade dos Estudos	94
Referências Bibliográficas	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química de alguns dos principais óleos vegetais.	23
Tabela 2: Produção anual brasileira de óleo (mil toneladas) de 2002 a 2006.	24
Tabela 3: Características do OMI novo.	36
Tabela 4: Características do OVI novo (ABNT NBR 15422, 2006).	37
Tabela 5: Relação de ensaios realizados nos óleos e equipamentos utilizados.	48
Tabela 6: Caracterização físico-química do óleo OMI.	61
Tabela 7: Caracterização físico-química dos óleos vegetais estudados.	62
Tabela 8: Período de indução dos óleos aditivados OV-1, OV-2 e OV-3.	67
Tabela 9: Comparativo entre o tempo de Indução dos óleos estudados aditivados com AD-4, os óleos comerciais e o OMI.	67
Tabela 10: Grau de polimerização para o papel Kraft isolante em função do tempo de envelhecimento, a 95°C para os óleos OV-1, OV-2 E OV-3 não aditivados.	75
Tabela 11: Grau de polimerização para o papel Kraft isolante em função do tempo de envelhecimento, a 95 °C para os óleos OV-1, OV-2 E OV-3 aditivados e demais fluidos isolantes comerciais	76
Tabela 12: Grau de polimerização para o papel Kraft isolante em função do tempo de envelhecimento, a 140 °C para os óleos OV-1, OV-2 E OV-3 aditivados e demais fluidos isolantes comerciais	76
Tabela 13: GP do papel Kraft isolante envelhecido em OMI e OVI (OVI-A).	77
Tabela 14: Coeficientes de Solubilidade de Ostwald.	78
Tabela 15: Concentração de gases dissolvidos (ppm) para os óleos após submissão dos mesmos ao esforço elétrico.	79

Tabela 16: Concentração de gases dissolvidos (ppm) para os óleos após submissão dos mesmos ao esforço térmico.....	81
Tabela 17: Ensaio de Elevação de Temperatura.	83
Tabela 18: Medição das Perdas em Vazio e em Carga dos Transformadores de Distribuição.....	84
Tabela 19: Ensaio de Elevação de Temperatura dos Transformadores de Distribuição.....	85
Tabela 20: Concentração de gases dissolvidos (ppm) para os óleos antes dos ensaios elétricos.....	91
Tabela 21: Concentração de gases dissolvidos (ppm) para os óleos após o ensaio elétrico.	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Transformador de Distribuição trifásico.....	9
Figura 2: Ilustração do detalhe do núcleo de um transformador.	10
Figura 3: Ilustração da Destilação fracionada do Petróleo.	14
Figura 4: Etapas do processo de peroxidação do OMI.	16
Figura 5: Produtos de oxidação do OMI.....	18
Figura 6: Esquema ilustrativo das reações de formação da borra, a partir dos compostos de oxidação do OMI.	19
Figura 7: Ilustração do mecanismo de atuação do aditivo antioxidante (XOH) na supressão de radicais livres (R^\cdot , XO^\cdot , ROO^\cdot) e conseqüente retardamento do envelhecimento do OMI.	20
Figura 8: Reações de Pirólise do OMI.....	21
Figura 9: Estrutura química do triacilglicerol que compõe o óleo vegetal.....	22
Figura 10: Etapas do processo de autooxidação de óleos insaturados.	31
Figura 11: Formação de ácido graxo proveniente da reação de hidrólise do OVI.....	32
Figura 12: Mecanismo de ação para antioxidantes primários. Onde: ROO^\cdot e R^\cdot são radicais livres, AH é o antioxidante com um hidrogênio ativo e A^\cdot é radical inerte.....	34
Figura 13: Representação esquemática da estrutura da celulose formada pela união de unidades de β -D-glucose.....	40
Figura 14: Compostos furânicos produzidos na degradação da celulose do papel de isolamento dos transformadores e detectáveis no óleo isolante.	45
Figura 15: Amostras dos óleos com papel Kraft isolante antes do ensaio de envelhecimento acelerado a 95, 130 e 140 °C.....	52

Figura 16: Ensaio de envelhecimento acelerado do papel Kraft isolante no óleo, realizado em banho termoequilibrado a 95, 130 e 140 °C, com borbulhamento de oxigênio.	53
Figura 17: Efeito do envelhecimento acelerado dos óleos não-aditivados sobre o índice de neutralização: (■) OV-1; (▲) OV-2; (●) OV-3; (□) OVI-A e (Δ) OVI-B.	64
Figura 18: Efeito do envelhecimento acelerado dos óleos não-aditivados sobre a viscosidade cinemática a 40 °C: (■) OV-1; (▲) OV-2; (●) OV-3; (□) OVI-A e (Δ) OVI-B.	65
Figura 19: Efeito do envelhecimento acelerado dos óleos não-aditivados sobre o fator de perdas dielétricas a 90 °C: (■) OV-1; (▲) OV-2; (●) OV-3; (□) OVI-A e (Δ) OVI-B.	66
Figura 20: Efeito do envelhecimento acelerado dos óleos aditivados com AD-4 sobre o índice de neutralização: (■) OV-1; (▲) OV-2; (●) OV-3; (□) OVI-A e (Δ) OVI-B.	68
Figura 21: Efeito do envelhecimento acelerado dos Óleos aditivados com AD-4 sobre a Viscosidade Cinemática a 40°C: (■) OV-1; (▲) OV-2; (●) OV-3; (□) OVI-A e (Δ) OVI-B.	69
Figura 22: Efeito do envelhecimento acelerado dos Óleos aditivados com AD-4 sobre o Fator de Perdas Dielétricas a 90°C: (■) OV-1; (▲) OV-2; (●) OV-3; (□) OVI-A e (Δ) OVI-B.	70
Figura 23: Compostos furânicos no óleo OV-1. ■ Álcool Furfurílico e □ 2 Furfuraldeído	72

Figura 24: Compostos furânicos no óleo OV-2. ■ Álcool Furfurílico e □ 2 Furfuraldeído	72
Figura 25: Compostos furânicos no óleo OV-3. ■ Álcool Furfurílico e □ 2 Furfuraldeído	73
Figura 26: Compostos furânicos no óleo OVI-A.■ Álcool Furfurílico e □ 2 Furfuraldeído	73
Figura 27: Compostos furânicos no óleo OVI-B.■ Álcool Furfurílico e □ 2 Furfuraldeído	74
Figura 27: Representação dos oscilogramas para as curvas da corrente (—), da tensão aplicada (—) e de tensão medida (—), para o transformador 75 kVA, preenchido com óleo OV-1 aditivado. (a) Terminal H1; (b) Terminal H2 e (c) Terminal H3.....	87
Figura 28: Representação dos oscilogramas para as curvas da corrente (—), da tensão aplicada (—) e de tensão medida (—), para o transformador 75 kVA, preenchido com óleo OV-2 aditivado como fluido isolante. (a) Terminal H1; (b) Terminal H2 e (c) Terminal H3.....	88
Figura 29: Representação dos oscilogramas para as curvas da corrente (—), da tensão aplicada (—) e de tensão medida (—), para o transformador 75 kVA, preenchido com óleo OV-3 aditivado como fluido isolante. (a) Terminal H1; (b) Terminal H2 e (c) Terminal H3.....	88
Figura 30: Representação dos oscilogramas para as curvas da corrente (—), da tensão aplicada (—) e de tensão medida (—), para o transformador 75 kVA, preenchido com o óleo OVI-A como fluido isolante. (a) Terminal H1; (b) Terminal H2 e (c) Terminal H3.	89

Figura 31: Representação dos oscilogramas para as curvas da corrente (—), da tensão aplicada (—) e de tensão medida (—), para o transformador 75 kVA, preenchido com óleo OVI-B como fluido isolante. (a) Terminal H1; (b) Terminal H2 e (c) Terminal H389

Figura 32: Representação dos oscilogramas para as curvas da corrente (—), da tensão aplicada (—) e de tensão medida (—), para o transformador 75 kVA, preenchido com OMI como fluido isolante. (a) Terminal H1; (b) Terminal H2 e (c) Terminal H3.....90

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E UNIDADES

2-FAL – 2-Furfuraldeído

ABB – Asea Brown Boveri

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANP – Agência Nacional de Petróleo

ASTM – American Society for Testing and Materials

AT – Alta tensão

BEN – Balanço energético nacional

BT – Baixa tensão

Ca – Conteúdo de aromáticos

CE – Comissão de Estudos

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

CH₄– Metano

C₂H₆ – Etano

C₂H₄ – Etileno

C₂H₂ – Acetileno

CIGRÉ – Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica

Cn – Conteúdo de naftênicos

CO – Monóxido de carbono

CO₂ – Dióxido de carbono

COBEI – Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Iluminação e
Telecomunicação

COPEL – Companhia Paranaense de Energia

Cp – Conteúdo de parafínicos

ELETRONORTE – Centrais Elétricas do Norte do Brasil SA

FT – Força Tarefa

GAP – Abertura

GE – General Electric Company

GP – Grau de polimerização

GT – Grupo de trabalho

H1, H2 e H3 – Terminais de alta tensão

IN – Índice de neutralização

IEC – International Electrotechnical Commission

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

KOH – Hidróxido de potássio

LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento

mg KOH/g – miligrama de KOH por grama de óleo

NBI – Nível básico de isolamento

NBR – Norma Brasileira

ND – Não detectado

NR – Não registrado

NO_x – Óxido de nitrogênio

OMI – Óleo mineral isolante

OVI – Óleo vegetal isolante

ppm – Parte por milhão

R – Radical

rpm – rotações por minuto

S - Siemens

SF₆ – Hexafluoreto de enxofre

SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica

X1, X2 ou X3 – Terminal de baixa tensão

WORKSPOT – International Workshop on Power Transformer

RESUMO

O setor elétrico vem buscando alternativas para a substituição do óleo mineral tradicionalmente utilizado como fluido isolante em transformadores de distribuição por fluidos biodegradáveis e renováveis. Existem, no mercado, óleos sintéticos biodegradáveis a base de ésteres que apresentam característica biodegradável, mas a utilização destes óleos no setor elétrico brasileiro é insignificante devido ao seu elevado custo. Mais recentemente, têm sido introduzidos óleos vegetais isolantes à base de ésteres naturais, denominados de fluidos ecologicamente corretos devido a sua característica biodegradável e renovável.

O objetivo deste trabalho consistiu no estudo de diferentes óleos vegetais como matérias primas alternativas às usadas na fabricação de óleos vegetais isolantes comercialmente disponíveis no Brasil. Para isso foram escolhidos quatro tipos de óleos vegetais, a base de soja, girassol, arroz e mamona, denominados de OV-1, OV-2, OV-3 e OV-4. Estes óleos foram usados conforme recebidos e suas características físico-químicas comparadas com as de produtos comercialmente disponíveis denominados de OVI-A (à base de soja) e OVI-B (mistura de óleos) e com as do óleo mineral isolante (OMI). Usando como metodologia a caracterização química e físico-química dos óleos, ensaios de envelhecimento acelerado em escala laboratorial, aditivação com aditivos antioxidantes disponíveis no mercado e ensaios elétricos de campo, foram estabelecidos parâmetros de comparação entre os diferentes óleos analisados e os óleos comerciais, usados como base de comparação neste trabalho.

Os resultados preliminares de caracterização, realizados com base na norma ABNT NBR 15422 referente à especificação de óleo vegetal isolante novo para equipamentos elétricos, indicaram o óleo vegetal denominado OV-2 como a matéria prima mais compatível com os parâmetros estipulados nesta norma, com exceção do teor de água, cujo valor ficou acima do valor limite estipulado. No entanto, este parâmetro pode ser ajustado a partir da adoção de um procedimento adequado de secagem. Já, os ensaios elétricos, evidenciaram a ocorrência de uma pequena falha elétrica nos transformadores enchidos com os óleos OV-2 e OV-3.

A partir dos ensaios realizados, pode-se concluir que os óleos vegetais testados neste trabalho apesar de atenderem a especificação da norma ABNT NBR 15422 e, portanto, serem potenciais candidatos para produção de fluidos isolantes, não podem ser utilizados da forma como foram recebidos, ou seja, sem nenhum tratamento adequado para viabilizar seu uso como fluidos isolantes.

ABSTRACT

The electrical sector is searching substitutions for the traditionally insulating mineral oil used in power transformers for renewed and biodegradable fluids. In the market exists biodegradable synthetic oils with ester base, but the use of these oils in the Brazilian electrical sector is insignificant because it's raised much cost. More recently, have been introduced in the market, isolating vegetable oils with ester base, called of ecologically correct fluids for these characteristic of biodegradable and renewable.

The objective of this work is studies different vegetables oils as alternative substances to used in manufacture of commercially isolating vegetable oils in Brazil, these oils is soy, maize and sunflower base with high oleic acid, for example. For this, four types of vegetal oils had been chosen (OV-1, OV-2, OV-3 and OV-4). These oils had been received and its characteristics physicist-chemistries compared with the ones commercially available, OVI-A and OVI-B, and with the ones of isolating mineral oil (OMI). Using as methodology the chemical and physicist-chemistry characterization of oils, tests of accelerated aging in laboratorial scale, additive with available antirust additives in the market and electrical field tests, had been established parameters of comparison among different analyzed oils and commercial oils, used as base of comparison in this work.

The preliminary results carried through ABNT NBR 15422 norm - specification to the new isolating vegetable oil for electric equipment, had indicated vegetable oil called OV-2 as the substance more compatible with the parameters stipulated in this norm, with exception of the water test, whose value was above of the boundary-value

stipulated in the norm. However, this parameter can be adjusted from the adoption of an adequate procedure of drying. For the additive and the accelerated aging tests, the best reply is for oil OV-1, that presented similar behavior to used commercial isolating vegetable oils as parameters. Already the electric tests, the occurrence of a small electric imperfection in the transformers filled with oils OV-2 and OV-3 was noted

Based in tests, can be concluded that the tested vegetable oils in this work are potential candidates for isolating fluid, however cannot be used, of the form as they had been received, that is, without adequate treatment.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste trabalho destacam-se, inicialmente, as principais características do estudo e a importância da pesquisa no contexto atual.

No primeiro capítulo, é feita a revisão bibliográfica sobre a utilização dos óleos isolantes de origem mineral e vegetal em transformadores, sua obtenção, constituição e os mecanismos de envelhecimento, bem como suas características e ensaios físico-químicos de caracterização e de monitoramento.

Com base nas características necessárias para a utilização e para o desenvolvimento do projeto, elaborou-se a pesquisa experimental, disposta no segundo capítulo, no qual estão apresentadas as características dos materiais, os principais equipamentos utilizados e a metodologia empregada para a avaliação do desempenho dos fluidos isolantes de origem vegetal, em escala laboratorial.

No terceiro capítulo estão apresentados e discutidos os resultados obtidos neste estudo e no quarto capítulo estão apresentadas as conclusões do trabalho e, também, as sugestões para trabalhos futuros.

Finalmente, têm-se as citações bibliográficas referentes ao desenvolvimento deste trabalho.

1.1. CARACTERÍSTICAS DA PESQUISA

Esta dissertação de mestrado faz parte do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais (PIPE), da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

O estudo foi vinculado ao projeto de pesquisa intitulado **“Óleos Ecológicos para Transformadores de Distribuição”**, o qual teve apoio financeiro da Companhia Paranaense de Energia – COPEL, dentro do programa de P&D da ANEEL, nos ciclos 2004/2005 e 2005/2006.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de aplicação de óleos vegetais de origem nacional, como fluidos isolantes em transformadores de distribuição, comparando seu desempenho com o do óleo mineral isolante (OMI) e com óleos vegetais isolantes (OVIs) comercialmente disponíveis.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa foram:

- a. Estudar a estabilidade oxidativa dos óleos vegetais comparativamente aos OVIs comercialmente disponíveis.
- b. Avaliar a influência dos óleos vegetais no processo de envelhecimento do papel Kraft isolante em comparação aos OVIs comercialmente disponíveis e ao OMI.
- c. Avaliar a formação de gases dissolvidos nos óleos vegetais em comparação aos fluidos isolantes comercialmente disponíveis (OVIs e OMI), quando submetidos a cargas de esforço elétrico e térmico.

- d. Avaliar a suportabilidade elétrica de novos transformadores de distribuição isolados com os óleos vegetais em estudo comparativamente aos OVIs comercialmente disponíveis e ao OMI.

1.3 TRABALHOS RESULTANTES DA PESQUISA REALIZADA

Uma pesquisa ou estudo, por mais interessantes ou inovadoras que sejam suas conclusões, pode ser de pouca valia se os resultados obtidos não forem divulgados no meio técnico-científico e/ou transferidos ao mercado.

O projeto de pesquisa que fundamentou a elaboração desta dissertação gerou os trabalhos a seguir relacionados:

- WILHELM, H. M.; STOCCO, M. B. C.; UHREN, W.; GOMES Jr., S. B.; TULIO, L.; OLIVEIRA, S. M.; STOCCO, G. B.; **Óleos Ecológicos para Transformadores de Distribuição**. Relatório Técnico Final – Programa P&D Copel-Aneel ciclo 2004-2005. Curitiba. 200 p., 2009.
- WILHELM, H. M.; STOCCO, M. B. C.; TULIO, L.; OLIVEIRA, S. M.; STOCCO, G. B. **Análise de Óleos Vegetais como potenciais fluidos isolantes em transformadores de distribuição**. Submetido à revista de P&D da Aneel, 14 p., maio de 2009.
- WILHELM, H. M.; STOCCO, M. B. C.; OLIVEIRA, J.; UHREN, W.; GOMES Jr., S. B. **Investigação de óleos vegetais como potenciais fluidos de segurança**. Revista Eletricidade Moderna. São Paulo: Arandanet, p. 140 a 147, agosto de 2009.

WILHELM, H. M.; STOCCO, M. B. C.; TULIO, L.; OLIVEIRA, S. M.; UHREN, W.; GOMES Jr.; **Vegetable oils as potential insulating fluids for distribution transformers**. Artigo submetido para o periódico *Dielectrics and Electrical Insulation*, *IEEE Transactions on* em abril de 2010

1.4 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

A eficácia do sistema de isolamento e de refrigeração dos equipamentos elétricos que utilizam OMI e papel Kraft isolante é reconhecida tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. Porém, do ponto de vista ambiental, no caso de acidentes com vazamentos ou derramamentos, o OMI, por ser um derivado do petróleo, pode trazer impactos ambientais significativos e, conseqüentemente, consideráveis impactos econômicos para a concessionária.

O OVI, além de atender às características dielétricas e refrigerantes, apresenta algumas vantagens em relação ao OMI, principalmente, por ser considerado fluido de segurança, ser biodegradável e ser proveniente de fonte renovável.

Apesar dessas características favoráveis, a utilização dos fluidos à base de óleo vegetal no setor elétrico é limitada por vários fatores, sendo os principais, a insuficiência de conhecimento técnico quanto ao seu desempenho em campo, a definição de valores limites provisórios para os ensaios de acompanhamento da condição do fluido em uso (manutenção preditiva) e o custo, este ainda alto devido ao desconhecimento técnico que não ainda permite a produção em larga escala.

O aspecto inovador desta proposta consistiu na investigação da suportabilidade elétrica de novos transformadores de distribuição, isolados com óleos vegetais de origem nacional, aditivados em laboratório, em comparação ao desempenho de transformadores isolados com OVIs comercialmente disponíveis e ao OMI, visando a indicação de matérias-primas alternativas para produção destes fluidos isolantes no Brasil.

2. INTRODUÇÃO

A disponibilidade de petróleo no mercado mundial é finita e a dependência excessiva em sua oferta traz sérios problemas sócio-econômicos e ambientais (CHANG, GERPEN & LEE *et al.*, 1996). Ciente deste fato, o setor elétrico vem buscando alternativas para a substituição do óleo mineral, derivado do petróleo e tradicionalmente utilizado como fluido isolante em transformadores de distribuição e de transmissão, por fluidos biodegradáveis e renováveis. Existem, no mercado, óleos sintéticos biodegradáveis a base de ésteres, como sendo potenciais substitutos do OMI. Estes óleos vegetais sintéticos além da característica biodegradável, porém não renovável, apresentam temperaturas de combustão mais elevadas em relação ao OMI, o que reduz a possibilidade de ocorrência de incêndios durante eventuais falhas no transformador de distribuição. Porém, a utilização destes óleos no setor elétrico brasileiro é insignificante devido ao seu elevado custo. Mais recentemente, têm sido introduzidos no mercado internacional OVIs, denominados de fluidos ecologicamente corretos devido a sua característica biodegradável e renovável (WILHELM, GRANATO & TULIO *et al.*, 2006).

Estes óleos são considerados renováveis porque, diferentemente do combustível fóssil, o gás carbônico (CO₂) liberado na sua combustão e/ou degradação por agentes biológicos é reciclado por absorção durante o próprio crescimento das oleaginosas (fotossíntese). Assim, a produção do OVI está inserida em um processo cíclico que auxilia na minimização do efeito estufa, pois há um equilíbrio entre a massa de carbono fixada e aquela liberada ou dispersa na atmosfera (UHREN, 2007).

O efeito estufa é atualmente uma das maiores preocupações do mundo moderno e sua origem reside no crescente aumento da concentração atmosférica de gases poluentes, como o CO₂, o metano (CH₄) e os óxidos de nitrogênio (NO_x) que provocam alterações profundas no equilíbrio térmico do planeta. A esse efeito, também chamado de aquecimento global, seguem-se danos sócio-ambientais significativos, como o degelo nos círculos polares, avalanches, enchentes, estiagens e secas, além de alterações na vida marinha, geralmente atribuídas ao aquecimento de águas profundas e a mudanças no regime de correntes oceânicas. Como consequência, há uma significativa diminuição da qualidade de vida e um aumento do índice de pobreza da população que habitam as regiões mais afetadas (RAMOS, 2003).

Utilizando fluidos dielétricos biodegradáveis e renováveis as concessionárias de energia estarão contribuindo para o desenvolvimento econômico e social das regiões produtoras dessas oleaginosas, gerando riquezas e divisas para o estado; para a necessidade de aumento da produção de empregos na área rural; para a fixação do homem no campo, pelo fomento à agroindústria; e para a melhoria de oportunidades para a agricultura familiar. Além disso, o interesse particular das concessionárias por estes fluidos biodegradáveis, renováveis e nacionais pode ser justificado, principalmente, por danos ambientais, pela diminuição da dependência de um fluido derivado do petróleo, recurso não renovável e pela utilização de recursos nacionais economicamente mais viáveis (RAMOS, 2003).

Ainda que o emprego de OVI em equipamentos elétricos de alta tensão tenha iniciado há algum tempo em países desenvolvidos, não há, até o presente momento,

experiência acumulada no Brasil quanto ao seu desempenho neste tipo de aplicação.

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 Energia Elétrica

A facilidade de geração, transporte, distribuição e utilização da energia elétrica, com as conseqüentes transformações em outras formas de energia, atribuem à mesma uma característica de universalização, disseminando o seu uso pela humanidade. No mundo de hoje, eletricidade, da mesma forma que alimento e moradia, é um direito humano básico (TULIO, 2008).

A geração de energia elétrica envolve alta tecnologia, desde a sua geração propriamente dita, pelas turbinas, até a transmissão e a distribuição da eletricidade gerada nas usinas para os consumidores finais, industriais e residenciais. A energia mecânica é gerada pela rotação de turbinas e transformada em energia elétrica no gerador. Tem sua tensão elevada em transformadores elevadores, ainda dentro das usinas, disponibilizando a mesma para o transporte.

O transporte de energia é feito por linhas de transmissão até as subestações e, por meio delas, a energia chega ao consumidor final. Tanto na fase de geração como nas de transmissão e de distribuição, a energia varia em sua tensão com o objetivo de diminuir perdas durante o seu transporte. Esta variação é executada, de modo geral, por equipamentos denominados transformadores. O processo de variação da tensão é iniciado dentro das usinas, por meio dos transformadores elevadores, seguido pelas subestações, pelos transformadores de transmissão e,

por último, pela rede elétrica, pelos transformadores de distribuição, que têm como objetivo disponibilizar a energia elétrica em tensões de 110 e 220 V para o consumidor final (GOMES, 2006).

2.1.2 Transformadores de Distribuição

Transformadores de distribuição, ilustrado na Figura 1, têm por função rebaixar a tensão à carga de utilização do consumidor final. Os transformadores de distribuição representam um dos últimos estágios para que a energia gerada possa ser utilizada pelo consumidor. Dessa forma, para que a confiabilidade do sistema de fornecimento de energia elétrica se complete, a qualidade requerida dos grandes equipamentos também deve se estender aos transformadores de distribuição (SIEMENS, 2009).



Figura 1: Transformador de Distribuição trifásico.

Fonte: WEG, 2009.

A principal parte do transformador é o seu sistema de isolamento, que é constituído, basicamente, por um líquido isolante e uma isolação sólida, o papel Kraft. O papel é praticamente o elemento responsável por definir a sua vida útil, pois o mesmo não é regenerativo, diferente do óleo em uso que pode ser tratado ou

regenerado até o ponto de poder ser novamente utilizado. A Figura 2 apresenta detalhes do sistema isolante em um transformador (MEYERS, KELLY & PARRISH, 1982).

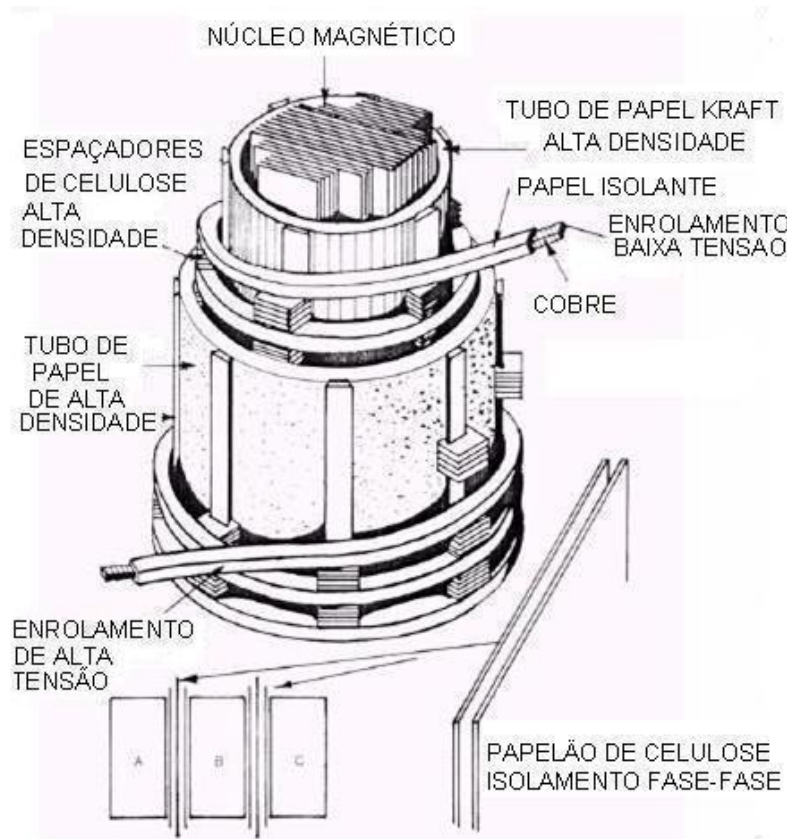


Figura 2: Ilustração do detalhe do núcleo de um transformador.

Fonte: Adaptado de MEYERS, KELLY & PARRISH, 1982.

Também, fazem parte do núcleo do transformador, resinas e fibras, que são empregadas com a finalidade de fixar os componentes isolantes e magnéticos. Materiais elastômeros e tintas compatíveis com óleo isolante são utilizados com a finalidade de promover a vedação e a proteção do equipamento (MEYERS, KELLY & PARRISH, 1982).

Durante o funcionamento dos transformadores vários processos de desgaste e de envelhecimento ocorrem no sistema de isolamento. Os efeitos de fadiga térmica, química, elétrica e mecânica, tais como, pontos quentes, sobre-aquecimentos, sobre-tensões e vibração são responsáveis por alterações do sistema isolante e devem ser monitorados para garantir a eficiência do equipamento, permitindo intervenções de manutenção preventiva e preditiva, a fim de evitar paradas de máquina e, conseqüentemente, aumento de custos (MILASH, 1984).

Devido aos investimentos feitos no Brasil durante o processo de desenvolvimento ocorrido nas décadas de sessenta e setenta, hoje há um grande número de transformadores com idade acumulada de trinta ou mais anos de operação. Estes transformadores são elementos de ligação muito importantes dentro de um sistema de energia elétrica (NUNES Jr, GALDEANO & CAMPOS, 2000).

Principalmente nos países da América do Sul e do terceiro mundo, a escassez de recursos impossibilita a renovação e atualização dos sistemas operativos, a aquisição de novos equipamentos e a modernização de indústrias. Portanto, faz-se necessária a realização de manutenção preventiva e preditiva para que os sistemas e equipamentos sejam mantidos nas mais perfeitas condições operacionais, para operar e para que a vida útil dos mesmos seja mantida ou ampliada (GRANATO, LEVY & TULIO, 2001).

A manutenção preventiva é uma técnica baseada na intervenção em equipamentos que consiste em corrigir previamente situações ou componentes cuja deterioração ou desgaste são conhecidos. Tem como objetivo principal reduzir a ocorrência de falhas, evitando as interrupções de funcionamento e diminuindo os custos da manutenção tradicional corretiva.

De uma forma prática, isto se traduz na substituição de partes dos equipamentos mais sujeitas ao desgaste, antes que venham a falhar, com o objetivo de garantir ou estender a vida útil de todo o sistema e evitar a ocorrência de falhas. Nos transformadores, o componente mais sujeito ao desgaste e à deterioração é o sistema papel/óleo isolante. Assim, sua vida útil está diretamente relacionada à vida do isolamento sólido aplicado sobre as espiras. Uma vez perdido este isolamento, a tarefa básica do transformador não será mais executada e o reparo necessário consistirá no re-isolamento total das bobinas. Portanto, a manutenção preventiva destes equipamentos não consiste na substituição periódica do papel isolante, devido ao alto custo desta operação (FERNANDES, 1988).

2.1.3 Fluidos Isolantes para Transformadores

A função de um óleo isolante em transformadores é a de garantir isolamento elétrico entre suas partes energizadas e a de permitir a refrigeração interna destas partes por meio da transferência de calor, substituindo ainda o possível ar existente entre aquelas partes proporcionando alta rigidez dielétrica e baixa condutividade entre si (ARANTES, 2005).

Os meios isolantes, de interrupção e de refrigeração, comumente usados em equipamentos elétricos são os mais diversos, podendo ser gasosos (ar, hexafluoreto de enxofre ou vácuo), líquidos (OMI e silicone), e sólidos (resinas epóxi ou fibra de vidro).

O OMI, que vem sendo utilizado em transformadores desde 1890 (a história do transformador começou em 1855 com uma patente conferida a Addenbrooke e

Ferranti), continua sendo, atualmente, o dielétrico líquido mais utilizado em transformadores em associação com o papel isolante.

2.1.3.1 Óleo Mineral Isolante (OMI)

O OMI utilizado em equipamentos elétricos é obtido pela destilação do petróleo e corresponde à fração obtida entre 300 e 400 °C , ilustrada na Figura 3. Este destilado pode ser de origem parafínica ou naftênica (LIPSTEIN SHAKHNOVICH, 1970 e CLARK, 1962). Trata-se de uma mistura de compostos na qual a maioria das moléculas é constituída por carbono e hidrogênio (hidrocarbonetos) e, em pequenas quantidades, por compostos que apresentam nitrogênio, enxofre e oxigênio em sua estrutura (WILSON, 1980).

Por mais de cem anos, o OMI proveniente do refino do petróleo tem sido usado como líquido isolante em transformadores. Muitos bilhões de litros de óleo estão em uso em equipamentos elétricos pelo mundo. A popularidade do OMI se deve a sua disponibilidade e seu baixo custo. Adicionalmente ele é um excelente meio de isolamento e de resfriamento (CLAIBORNE & CHERRY, 2006).

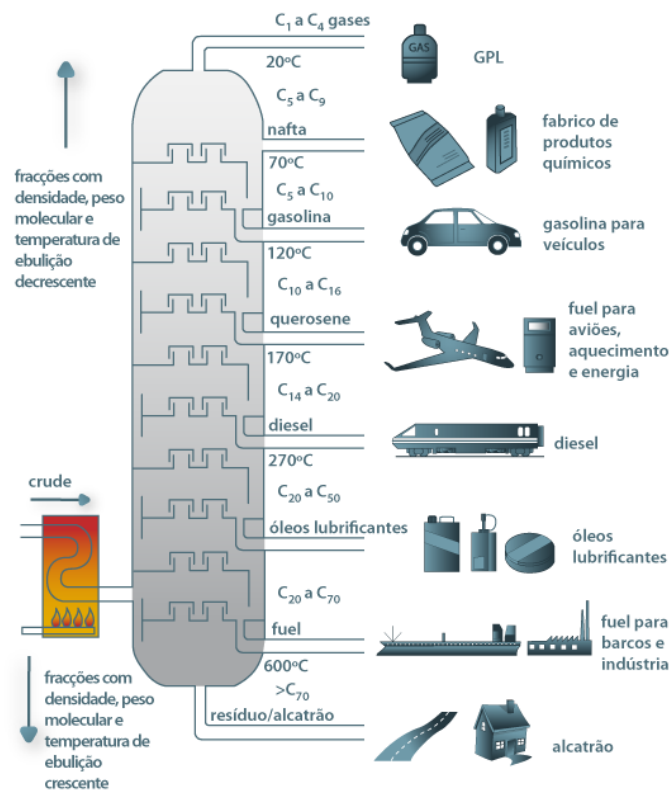


Figura 3: Ilustração da destilação fracionada do petróleo.

Fonte: FCTUC, 2009.

A classificação do OMI em parafínico ou naftênico é, normalmente, realizada segundo a norma ASTM D 2140, por meio de medidas de viscosidade, densidade, índice de refração e pela correlação entre estes resultados em um diagrama ternário. Alternativamente, a classificação do OMI em parafínico ou naftênico pode ser realizada com a utilização da técnica de espectroscopia na região do infravermelho, pela determinação do seu conteúdo parafínico (C_P). Óleos com C_P inferiores à 50% são considerados naftênicos enquanto que aqueles com C_P iguais ou superiores à 56% são classificados como parafínicos. Os óleos com valores de C_P entre 50 e 56% são classificados, em geral, como óleos intermediários (NYNÄS, 2004).

Durante a operação do equipamento, o OMI envelhece e mudanças

consideráveis ocorrem nas suas propriedades físicas, químicas e elétricas. Como conseqüências, ocorre:

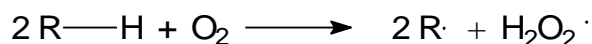
- deterioração das propriedades isolantes do óleo;
- aceleração do processo de degradação da celulose;
- formação de borra (material que se deposita na parte ativa dos transformadores, dificultando a transferência de calor).

Os OMIs apresentam reação de oxidação durante sua operação normal em transformadores e os procedimentos de manutenção devem levar em conta esta característica.

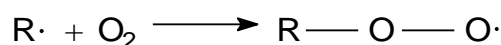
a) Processo Oxidativo dos Óleos Minerais Isolantes

Os OMIs são constituídos basicamente por compostos químicos da classe dos hidrocarbonetos. Portanto, o seu comportamento com relação à oxidação será determinado por estes compostos. Os hidrocarbonetos, sob a ação do calor, reagem com o oxigênio dissolvido no óleo conforme indicado na Figura 4.

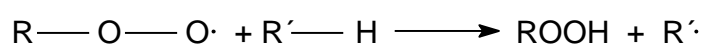
(1) Formação de radical livre - início da reação em cadeia.



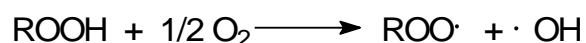
(2) Formação de radical peróxido - continuação da reação em cadeia.



(3) Formação de hidroperóxido - continuação da reação em cadeia.



(4) Transformação do hidroperóxido em radical peróxido - continuação da reação em cadeia.



(5) Combinação dos radicais formados - término da reação em cadeia.

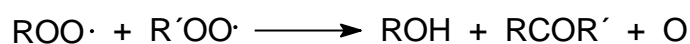
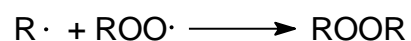
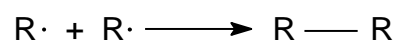


Figura 4: Etapas do processo de peroxidação do OMI.

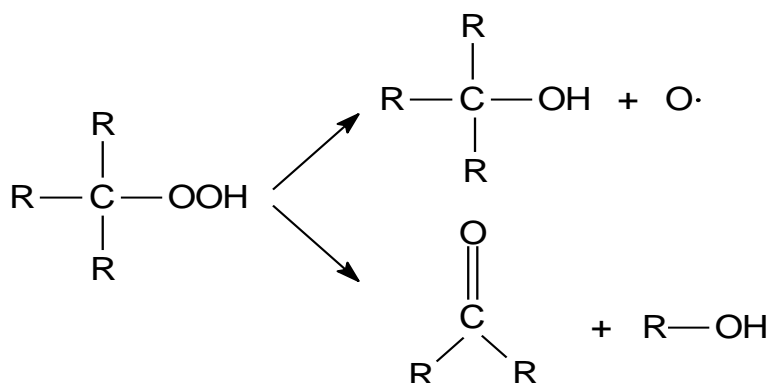
As etapas 2, 3 e 4 do processo de peroxidação do OMI (Figura 4) formam uma reação em cadeia, isto é, repete-se indefinidamente com velocidade crescente ao longo do tempo. A etapa lenta da reação é a primeira, a reação do hidrocarboneto com o oxigênio. Por isso, os aditivos antioxidantes devem ser substâncias que atuem nesta primeira etapa, reagindo com os radicais livres

formados sem dar origem a novos. Este comportamento é observado nos compostos aromáticos leves, que constituem a maioria dos antioxidantes para óleos minerais.

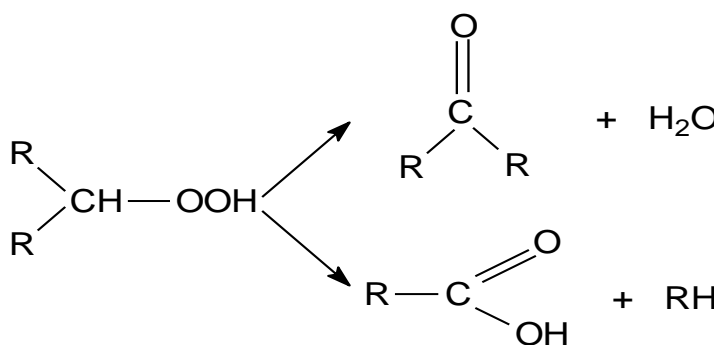
A presença de um radical livre, o qual pode ser formado fotoquimicamente ou por ativação térmica, é suficiente para formar inúmeros radicais livres por meio da reação em cadeia. Por isso, a velocidade da reação é uma função exponencial com o tempo, a uma dada temperatura. A velocidade da reação também aumenta com o aumento da temperatura de forma exponencial.

Após a formação dos hidroperóxidos, muitos produtos de oxidação são formados. Estes diferem de acordo com a espécie do hidroperóxido que lhes deu origem, conforme mostrado na Figura 5 (LIPSHTEIN & SHAKHNOVICH, 1970). Numa etapa seguinte, os produtos formados (álcoóis, aldeídos, cetonas, chamados de produtos intermediários da oxidação), na presença de oxigênio, dão origem aos ácidos carboxílicos.

(1) Formação de álcool e cetona a partir de hidroperóxido terciário.



(2) Formação de cetona e ácido a partir de hidroperóxido secundário.



(3) Formação de aldeído e ácido a partir de hidroperóxidos primário.

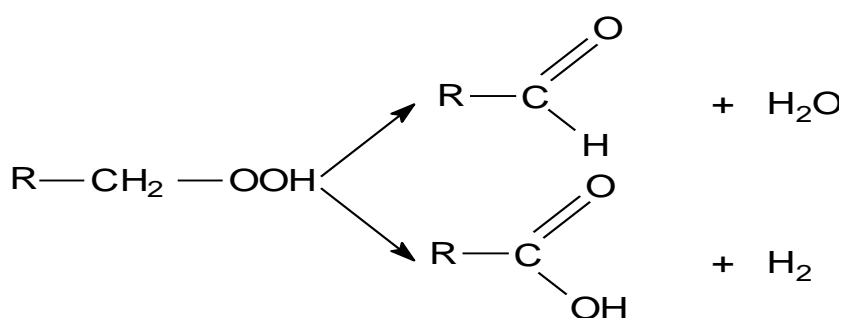


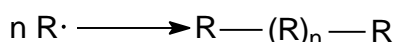
Figura 5: Produtos de oxidação do OMI.

Na etapa final, ocorrem reações de polimerização, ou seja, várias moléculas reagem formando um composto de alta massa molar (mais pesado que o óleo) que

se deposita sob a forma de borra. Esta borra pode ser de caráter apolar (polimerização via radical livre) e de caráter polar e ácido (polimerização de ácidos e alcoóis), conforme mostrado na Figura 6. Esses produtos finais de oxidação são compostos oxigenados com polaridade na molécula e, portanto maus isolantes elétricos. Além disso, os compostos ácidos formados são agentes aceleradores da degradação do papel isolante (MILASH, 1984).

Os produtos poliméricos formados na última etapa da reação (Figura 6) são extremamente prejudiciais à operação do equipamento, já que pela sua alta massa molar são sólidos que se depositam sobre a parte ativa do transformador impedindo a transmissão do calor. Por serem oxigenados, tendem a acumular água, acelerando ainda mais a degradação do papel (MILASH, 1984).

(1) Borra de caráter apolar (polimerização via radical livre)



(2) Borra de caráter polar e ácido (polimerização de ácidos e álcoois)

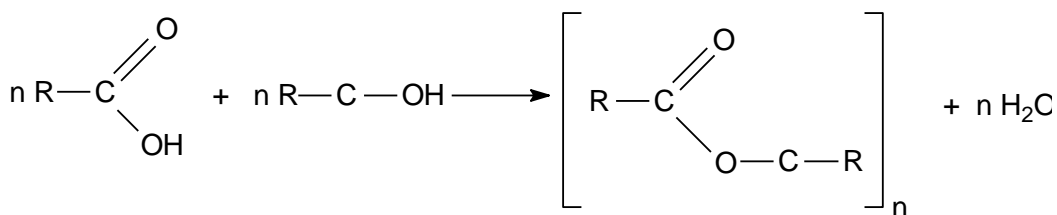


Figura 6: Esquema ilustrativo das reações de formação da borra, a partir dos compostos de oxidação do OMI.

A fim de estender a vida útil dos óleos minerais, inibidores de oxidação podem ser adicionados aos mesmos. Estes produtos reagem preferencialmente com os radicais livres e peróxidos, formando produtos mais estáveis e interrompendo a reação em cadeia, conforme representado na Figura 7 (LIPSHTEIN & SHAKHNOVICH, 1970).

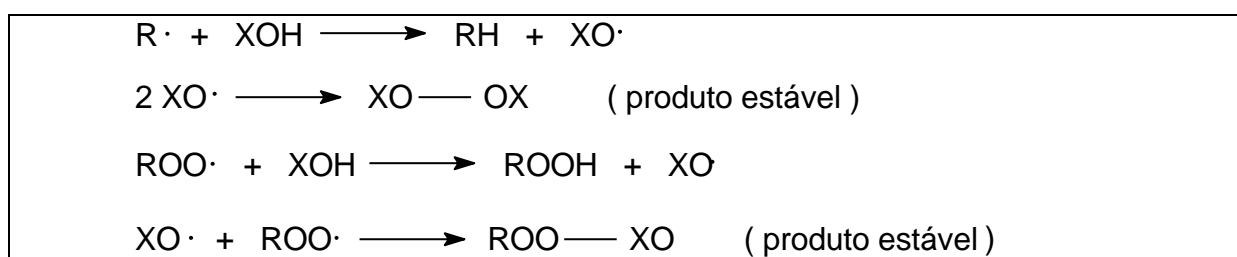


Figura 7: Ilustração do mecanismo de atuação do aditivo antioxidante (XOH) na supressão de radicais livres ($R\cdot$, $XO\cdot$, $ROO\cdot$) e conseqüente retardamento do envelhecimento do OMI.

b) Degradação Térmica dos Óleos Minerais

Os hidrocarbonetos pirolizam gerando outros hidrocarbonetos de menor massa molar. Isto é, sob a ação do calor suas estruturas degradam, gerando fragmentos de vários tamanhos, incluindo compostos de massa molar muito baixa e, portanto, gasosos. Esta reação obedece a leis termodinâmicas predeterminadas e assim, os produtos gerados pela pirólise são função da temperatura a que o óleo é submetido. As reações de pirólise mais importantes para a manutenção do OMI são as apresentadas na Figura 8. As reações 1 e 3 ocorrem a baixas temperaturas, em seguida, tem-se as reações 2, 4 e 5 em ordem crescente de temperatura.

(1) – C – C – C – C – C – + Calor → – C – C – C – C = C – + H ₂	(Hidrogênio)
(2) – C – C – C – C – C – + Calor → – C – C – C = C – + CH ₄	(Metano)
(3) – C – C – C – C – C – + Calor → – C – C – C = C – + C ₂ H ₆	(Etano)
(4) – C – C – C – C – C – + Calor → – C – C – C = C – + C ₂ H ₄	(Etileno)
(5) – C – C – C – C – C – + Calor → – C – C – C = C – + C ₂ H ₂	(Acetileno)

Figura 8: Reações de Pirólise do OMI.

Têm sido estudados desde 1930 os gases gerados pela pirólise do OMI, devido ao stress do papel e do líquido isolante, processo denominado de gases dissolvidos. O ponto de partida se deu com os estudos e publicações de HALSTEAD, em 1970. Estudos similares ocorreram a partir daí, especialmente na avaliação dos gases gerados pelo processo de degradação do papel isolante, dissolvidos no OMI. Há trinta anos, a técnica de análise de gases dissolvidos no óleo tem sido implementada e desenvolvida como ferramenta de diagnóstico para monitoramento de transformadores isolados a óleo mineral.

Durante o tempo de operação do transformador, os gases gerados permanecem dissolvidos no óleo e a cromatografia em fase gasosa é usada para analisar a concentração dos vários gases presentes, visando à emissão de diagnósticos de falhas, conhecida por DGA – “*Dissolved Gas Analysis*” (FERNANDES, 1998).

2.1.3.2 Óleo Vegetal Isolante (OVI)

Quimicamente, o óleo vegetal é formado por moléculas de acilgliceróis, mostrado na Figura 9, que são originárias da condensação entre ácidos graxos e glicerol (tri-álcool), formando ésteres de ácidos graxos. Assim, estes compostos são classificados em mono, di ou triacilgliceróis, dependendo se uma, duas ou três moléculas de ácido graxo se associa(m) covalentemente ao glicerol, respectivamente, formando ésteres de ácido graxo. É importante salientar que os triacilgliceróis podem ser formados por ácidos graxos iguais ou diferentes entre si, e, dependendo da origem da matéria prima, podem ser saturados ou insaturados (UHREN, 2007).

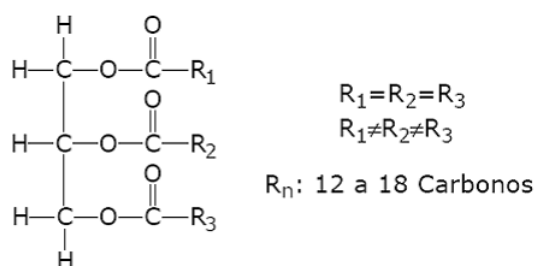


Figura 9: Estrutura química do triacilglicerol que compõe o óleo vegetal.

Fonte: UHREN, 2007.

Os óleos vegetais são sempre obtidos a partir de grãos, por processos de descortificação, descascamento, trituração, laminação, cozimento, prensagem mecânica ou extração por solvente. Ao final deste processo, tem-se o óleo bruto. Este óleo passa então pelos processos de degomagem, neutralização, branqueamento e desodorização, obtendo-se o óleo refinado (MORETTO & FETT, 1998).

As unidades acila presentes no triacilglicerol podem conter de 4 a 30 átomos de carbono, dependendo do ácido graxo que lhe deu origem. Estas unidades acila podem ser saturadas ou insaturadas. O número de insaturações pode variar entre 1 e 6, sendo que três insaturações são comuns. Normalmente, são encontrados ácidos graxos saturados, que contém de 8 a 22 átomos de carbono; com uma insaturação, que contém de 10 a 22 átomos de carbono; e com duas e três insaturações, cuja maioria contém 18 átomos de carbono, conhecidos como ácidos linoléico e linolênico, respectivamente (OOMMEN, 2002).

Com relação ao percentual de cada unidade acila, existe uma composição típica para cada tipo de óleo, mostrada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química de alguns dos principais óleos vegetais.

Fonte	Ácido graxo que deu origem as unidades acila do triacilglicerol (%)						
	Láurico	Mirístico	Palmítico	Esteárico	Oléico	Linoléico	Linolênico
Coco	45,0	20,0	5,0	3,0	6,0	-	-
Oliva	-	-	14,6	-	75,4	10,0	-
Amendoim	-	-	8,5	6,0	51,6	26,0	-
Algodão	-	-	23,4	-	31,6	45,0	-
Milho	-	-	6,0	2,0	44,0	48,0	-
Flax	-	3,0	6,0	-	-	74,0	17,0
Soja	-	-	11,0	2,0	20,0	64,0	3,0
Girassol	-	-	6,4	3,6	23,2	65,2	0,2

Fonte: Adaptado de ALSBERG & TAYLOR, 1928.

O óleo de soja (Tabela 1) é caracterizado pela presença das unidades provenientes dos ácidos linoléico (64,0%), oléico (20,0%), palmítico (11,0%), linolênico (3,0%) e esteárico (2,0%). A presença do elevado teor de compostos

insaturados, com destaque à presença de cerca de 3% da unidade derivada do ácido linolênico, torna este óleo bastante susceptível à oxidação. O óleo de girassol, por exemplo, é caracterizado pela presença das unidades provenientes dos ácidos linoléico (65,2%), oléico (23,2%), palmítico (6,4%), linolênico (0,2%) e esteárico (3,6%) (TULIO, 2008).

O Brasil ocupa uma posição privilegiada tanto em termos de biodiversidade quanto em capacidade de gerar recursos renováveis em grande escala. Este, detentor de uma grande extensão territorial, é o país de maior biodiversidade mundial, rica em oleaginosas, sendo a cultura da soja a primeira colocada na produção de oleaginosas no Brasil, como pode ser visto na Tabela 2 (TULIO, 2008).

Tabela 2: Produção anual brasileira de óleo (mil toneladas) de 2002 a 2006.

Espécie	2002	2003	2004	2005	2006
Soja	4.937,0	5.387,0	5.571,0	5.549,0	5.709,0
Algodão	195,7	217,0	268,4	251,2	270,8
Dendê	118,0	129,0	140,0	147,0	152,0
Girassol	55,7	62,1	74,6	76,2	78,6
Milho	45,9	55,0	63,6	65,6	68,0
Mamona	40,1	39,7	60,8	68,1	69,8
Canola	16,9	20,4	22,8	24,0	26,2
Amendoim	28,1	21,8	21,8	22,3	23,8
Palmiste	13,3	14,5	15,8	17,0	19,2
Linhaça	1,7	2,0	2,1	2,2	2,2
Coco	1,9	1,9	1,9	2,0	2,1
Total	5.454,3	5.950,4	6.242,8	6.224,6	6.421,7

Fonte: Yamaoka, 2007.

A utilização de OVIs iniciou com a substituição do OMI (*retrofilling* ou reenchimento) em transformadores em operação. O primeiro teste, sob este enfoque, foi realizado em dois transformadores de 225 kVA, tipo *pad-mounted*, alimentando fornos, instalados no início de 1970, sujeitos a um carregamento contínuo com 80% da corrente nominal (MC SHANE, LUKSICH & RAPP, 2003).

Em outubro de 2001 a empresa Alliant Energy fez o reenchimento do primeiro transformador de potência com OVI (fabricante: Pennsylvania; dados de placa do equipamento: trifásico, 50 MVA, 69 kV, NBI 350 kV, 7 000 galões de óleo, fabricado em 1957) (MC SHANE, LUKSICH & RAAP, 2003).

Experimentos utilizando óleos vegetais como dielétrico foram conduzidos na mesma época de realização dos primeiros testes com óleo mineral. Porém, os óleos vegetais demonstraram ser menos atrativos que o mineral devido à sua estabilidade à oxidação, ponto de fluidez, permissividade e viscosidade distintas (MC SHANE, 2002).

No entanto, impulsionado principalmente pela questão ambiental que tem sido motivo de preocupação da comunidade mundial de forma crescente, foram desenvolvidos, por volta de 1999, óleos vegetais apropriados para uso em equipamentos elétricos (LEWAND, 2004).

O primeiro produto comercial lançado no mercado foi o BIOTEMP[®], cuja patente foi requerida nos Estados Unidos da América (EUA), em setembro de 1999, pela empresa ABB. O fluido base usado foi o óleo de girassol obtido a partir de sementes geneticamente selecionadas, contendo um teor de ácido oléico superior a 80% (OOMMEN, 2002).

Também, foram concedidas duas patentes americanas referentes ao desenvolvimento de fluidos isolantes obtidos a partir do óleo de soja. A primeira no final de setembro de 1999 para a empresa Waverly Light & Power e a outra, em março de 2000, para a Cooper Industries, tendo o OVI o nome fantasia de ENVIROTEMP® FR3™ (LEWAND, 2004).

Os primeiros produtos comerciais de OVIs lançados no mercado nacional foram o BIOTEMP® (importado da Suécia pela ABB Brasil) e o ENVIROTEMP® FR3™ (comercializado pela Cooper Power Systems, fabricado pela Cargill). Recentemente, em 2007, foram lançados, no mercado nacional, os óleos BIOVOLT®, produzidos e comercializados a partir de uma tecnologia 100% nacional, pela empresa Mineraltec (WILHELM, GRANATO & TULIO, 2007).

Até maio de 2007, encontravam-se em operação, na América do Sul, cerca de 410 transformadores isolados com OVI nas tensões primárias de 440 a 230 000 V e de potência nominal entre 10 a 40 000 kVA (UHREN, 2007).

No Brasil, duas concessionárias de energia elétrica estão realizando testes utilizando o OVI em equipamentos elétricos de potência. A Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) colocou em operação o primeiro transformador do mundo que funciona totalmente a OVI. A combinação do OVI com a avançada tecnologia de materiais isolantes possibilitou que esse transformador, que inicialmente foi projetado para 25 MVA em 138 kV, segundo informação da CEMIG, seja sobrecarregado até 43 MVA, durante quatro horas consecutivas, sem perda de sua vida útil. Este equipamento está em operação desde agosto de 2006, na subestação de Contagem, na Região Metropolitana de Belo Horizonte (CEMIG, 2008).

As Centrais Elétricas do Norte (ELETRONORTE) e a filial brasileira da estatal francesa Areva desenvolveram em conjunto, o primeiro reator de 242 kV no mundo à base de OVI. Em obtendo êxito, a ELETRONORTE tem interesse em colocar mais equipamentos desse porte nas linhas que atendem a região Amazônica (ELETRONORTE, 2008).

Em dezembro de 2006, a Centrais Elétricas de Santa Catarina, CELESC, instalou em Porto Belo (SC), o primeiro transformador móvel a utilizar OVI no Brasil, com potência instalada de 30 MVA e tensão de 138 kV (CELESC, 2008).

A Companhia Paranaense de Energia (COPEL) também colocou em operação esta nova tecnologia no projeto da rede subterrânea de Foz do Iguaçu. O projeto da rede subterrânea de distribuição de eletricidade na Avenida Brasil, em Foz do Iguaçu (PR) incorpora algumas inovações técnicas que estão sendo introduzidas pela COPEL de forma pioneira no sistema elétrico brasileiro. Inaugurada em junho de 2006, uma delas é a adoção de transformadores que usam óleo vegetal como isolante elétrico em lugar do óleo mineral (COPEL, 2006). A rede subterrânea da Avenida Brasil tem 18 transformadores desse tipo, com potência individual de 500 kVA e operando confinados em câmaras especiais na tensão de 13,8 kV e com saídas de 220/127 V. A rede elétrica subterrânea atende cerca de 650 consumidores, como grandes edifícios e galerias, hotéis, bancos e lojas (COPEL, 2006).

Em junho de 2009, 22 equipamentos adquiridos pela Copel para estudos com isolamento a óleo vegetal foram instalados nas redes de distribuição situadas justamente no entorno das nascentes do rio Cascavel. Cada um dos transformadores – que operam na tensão de 13,8 kV com potência de 112,5 kVA -

comporta em torno de 100 l do fluido ecológico, sendo isolados com os óleos BIOVOLT A e BIOVOLT B (COPEL, 2009).

a) Propriedades dos óleos vegetais isolantes

Devido a sua natureza química, os ésteres naturais apresentam grande afinidade com a água. Esta propriedade contribui para o aumento da vida útil do isolamento sólido. Os resultados de estudos de envelhecimento mostram que o papel isolante tem sua vida estendida na presença de óleos de base vegetal em comparação aos transformadores isolados com óleo mineral (CLAIBORNE & CHERRY, 2006). Segundo RAPP e colaboradores a água no óleo vegetal é consumida no processo de hidrólise do triacilglicerol gerando ácidos graxos livres de cadeia longa (RAAP, McSHANE, CORKRAN *et al.*, 2001; RAAP, McSHANE, CORKRAN *et al.*, 2002 e RAPP, McSHANE, & LUKSICH, 2005). Este mecanismo de hidrólise favorece o deslocamento de mais moléculas de água do papel para o fluido isolante para manter o equilíbrio químico, ou seja, este deslocamento promove, de uma forma indireta, a secagem do papel Kraft isolante (RAAP, McSHANE, CORKRAN *et al.*, 2002). Adicionalmente, a literatura reporta que os compostos ácidos livres de cadeia longa formados a partir da hidrólise do triacilglicerol reagem com as hidroxilas da celulose via reação de esterificação, impedindo a degradação da celulose por estes sítios ativos (RAPP, McSHANE, & LUKSICH, 2005), ou seja, evitando sua degradação precoce. Estes trabalhos mostram os benefícios que o óleo vegetal pode trazer para o papel Kraft isolante quanto à extensão da sua vida útil. Resultados obtidos por WILHELM e colaboradores chamam a atenção para o OVI que, nestas condições, é sacrificado precocemente em função do processo de

hidrólise (WILHELM, GRANATO, TULIO *et al.*, 2006). Não há dados na literatura quanto à frequência de troca do OVI, em função deste sacrifício, em comparação ao OMI.

Os fluidos de ésteres naturais apresentam excelente desempenho dielétrico. A rigidez dielétrica é da mesma magnitude que a do OMI, do silicone e de fluidos de hidrocarboneto desenvolvidos para aplicações em altas temperaturas. No entanto, a água não afeta significativamente a rigidez dielétrica do OVI, diferentemente do OMI devido a propriedades químicas dos mesmos (CLAIBORNE & CHERRY, 2006).

b) Degradação Térmica dos Óleos Vegetais isolantes

TULIO (2008) avaliou a degradação de OVIs, a partir de ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório. Para tanto foram realizados dois tipos de envelhecimento: o primeiro foi realizado em sistema fechado, em frascos lacrados, a 120 °C, onde OVIs comerciais, foram envelhecidos na presença de papel Kraft isolante e o segundo foi realizado em sistema aberto, com borbulhamento de oxigênio, em três temperaturas distintas, a saber 70, 95 e 110 °C, onde o OVI foi envelhecido na presença de papel Kraft isolante.

Os resultados obtidos mostraram que parâmetros como oxigênio, temperatura e umidade afetam a degradação dos OVIs. Dependendo das condições operacionais do equipamento, da qualidade do óleo e do teor de umidade do papel Kraft isolante, a degradação dos OVIs pode ocorrer via oxidação ou hidrólise, passível de monitoramento por ensaios físico-químicos específicos (TÚLIO, 2008). Estes

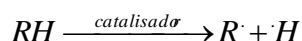
parâmetros são mencionados na literatura como os principais agentes de degradação do óleo vegetal comestível, onde as características de qualidade destes óleos sempre estão correlacionadas com o fenômeno da rancidez que é, sem dúvida nenhuma, o fenômeno deteriorativo mais importante deste tipo de produto. Existem dois tipos de rancidez descritas para o óleo vegetal comestível: a hidrolítica e a oxidativa (MORETTO & FETT, 1998). Assim, segundo TULIO (2008), a degradação do OVI segue o mesmo mecanismo de degradação reportado para o óleo vegetal comestível.

Na presença de oxigênio a degradação do OVI se dá preferencialmente pela rancidez oxidativa que está diretamente relacionada com a presença de ácidos graxos insaturados, ou seja, unidades acila contendo insaturações (WILHELM, GRANATO, TULIO *et al.*, 2007). Trata-se da reação do oxigênio atmosférico com as duplas ligações desses ésteres, cuja reatividade aumenta com o aumento do número de insaturações na cadeia. A reação de oxidação produz peróxidos e hidroperóxidos (produtos primários). Estes compostos por uma série de reações paralelas produzem compostos voláteis como aldeídos e cetonas (produtos secundários).

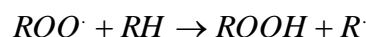
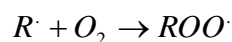
Na teoria dos radicais livres ilustrada esquematicamente na Figura 10, o processo se inicia num átomo de carbono em posição alfa do grupo acila insaturado, com formação de um radical livre, por perda de um átomo de hidrogênio (fase de indução). O radical livre reage com o oxigênio, formando o radical peróxido. Esses peróxidos podem participar das reações de decomposição e formação de novos radicais livres (fase de propagação). Quando os radicais livres reagem entre si,

inicia-se a terceira fase da reação (terminação). Os peróxidos e hidroperóxidos podem romper as duplas ligações formando então os compostos secundários (aldeídos e cetonas). A reação dos radicais livres necessita de um catalisador que pode ser energia luminosa ou metais como ferro ou cobre, por exemplo (MORETTO & FETT, 1998).

(1) Iniciação



(2) Propagação



(3) Terminação

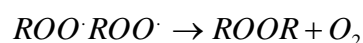
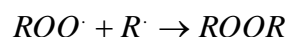
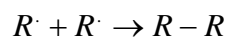


Figura 10: Etapas do processo de autoxidação de óleos insaturados.

Fonte: MORETTO & FETT, 1998.

O processo de polimerização pode ser iniciado por traços de metais, calor (termólise) e luz (fotólise) (KUMARATHASAN, RAJKUMAR, HUNTER, *et al.*, 1992).

Os peróxidos e hidroperóxidos produzidos pela reação de oxidação podem

polimerizar com outros radicais produzindo moléculas de elevada massa molar, sedimentos insolúveis, gomas e, em alguns casos, a cadeia do ácido graxo oxidado pode quebrar, produzindo ácidos de cadeias menores e aldeídos (PRANKL & SCHINDLBAUER, 1998).

Na presença de umidade, WILHELM e colaboradores (WILHELM, GRANATO, TULIO, *et al.*, 2007) sugerem que a degradação do OVI se dá preferencialmente pela hidrólise dos triacilgliceróis com produção de ácidos graxos livres conforme mostrado na Figura 11.

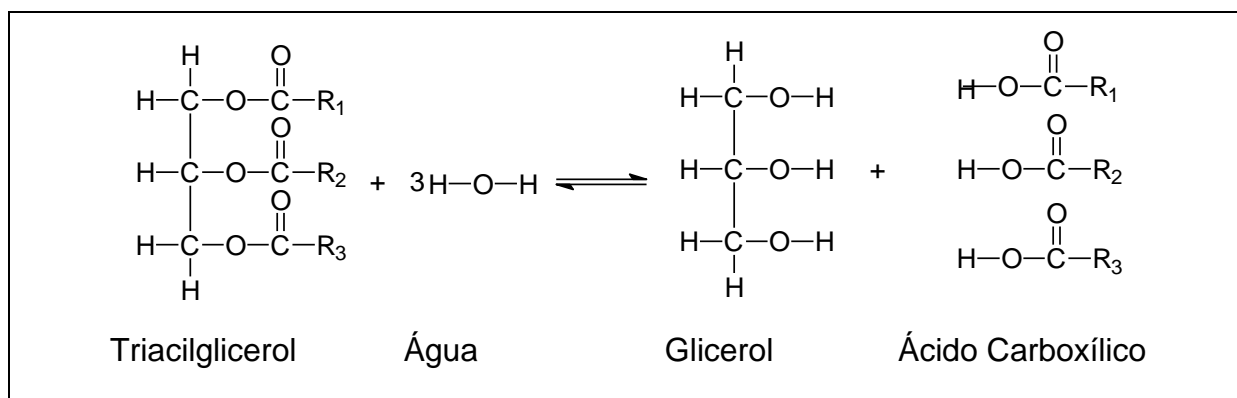


Figura 11: Formação de ácido graxo proveniente da reação de hidrólise do OVI.

Fonte: TULIO, 2008.

Com os resultados obtidos da degradação realizada em laboratório, TULIO (2008) concluiu que a viscosidade, o índice de neutralização e o fator de perdas dielétricas a 90 °C são os parâmetros importantes no monitoramento do envelhecimento de OVIs e que devem ser inseridos nos ensaios de manutenção preventiva de equipamentos isolados com este fluido. Estes resultados estão de

acordo com os publicados em julho de 2008 no guia de manutenção de equipamentos isolados com OVIs da IEEE (IEEE, 2008).

2.1.3.3 Aditivos Antioxidantes para Óleos Vegetais

Para evitar a autoxidação de óleos há necessidade de diminuir a incidência do maior número possível de fatores que a favorecem, minimizando os valores de energia que são responsáveis pelo desencadeamento do processo de formação de radicais livres, evitando a presença de traços de metais no óleo, evitando ao máximo o contato com oxigênio e bloqueando a formação de radicais livres por meio de antioxidantes, os quais, em pequenas quantidades, atuam interferindo nos processos de oxidação de lipídios (JORGE & GONÇALVES, 1998).

Segundo BAILEY, os antioxidantes podem ser classificados em primários, sinergistas, removedores de oxigênio, biológicos, agentes quelantes e antioxidantes mistos. (BAYLEY, 1996)

Os antioxidantes primários são compostos fenólicos que promovem a remoção ou inativação dos radicais livres formados durante a iniciação ou propagação da reação, pela doação de átomos de hidrogênio a estas moléculas, interrompendo a reação em cadeia (SIMIC & JAVANOVIC, 1994). FRANKEL apresentou o mecanismo de ação representado na Figura 12 (FRANKEL, 1980).

O átomo de hidrogênio ativo do antioxidante é abstraído pelos radicais livres R^\bullet e ROO^\bullet com maior facilidade que os hidrogênios alílicos das moléculas insaturadas. Assim, formam-se espécies inativas para a reação em cadeia e um

radical inerte (A^\bullet) procedente do antioxidante. Este radical, estabilizado por ressonância, não tem a capacidade de iniciar ou propagar as reações oxidativas (RAMALHO & JORGE, 1996).

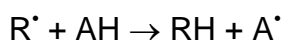
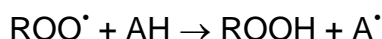


Figura 12: Mecanismo de ação para antioxidantes primários. Onde: ROO^\bullet e R^\bullet são radicais livres, AH é o antioxidante com um hidrogênio ativo e A^\bullet é radical inerte.

Fonte: RAMALHO & JORGE, 1996

Os sinergistas são substâncias com pouca ou nenhuma atividade antioxidante, que podem aumentar a atividade dos antioxidantes primários quando usados em combinação adequada com eles. Alguns antioxidantes primários quando usados em combinação podem atuar sinergisticamente (BAILEY, 1996).

Os removedores de oxigênio são compostos que atuam capturando o oxigênio presente no meio, por meio de reações químicas estáveis tornando-os, conseqüentemente, indisponíveis para atuarem como propagadores da autooxidação. Ácido ascórbico, seus isômeros e seus derivados são os melhores exemplos deste grupo. O ácido ascórbico pode atuar também como sinergista na regeneração de antioxidantes primários (BAILEY, 1996).

Os antioxidantes biológicos incluem várias enzimas, como glucose oxidase, superóxido dismutase e catalases. Estas substâncias podem remover oxigênio ou compostos altamente reativos de um sistema alimentício (BAILEY, 1996).

Os agentes quelantes/seqüestrantes complexam íons metálicos, principalmente cobre e ferro, que catalisam a oxidação lipídica. Um par de elétrons não compartilhado na sua estrutura molecular promove a ação de complexação (BAILEY, 1996).

2.1.3.4 Especificações Técnicas dos Óleos Isolantes

O OMI novo, antes do contato com o equipamento, deverá atender as especificações constantes na Resolução 36 da ANP, de 05.12.2008 (ANP, 2008) para óleo naftênico e parafínico. A Tabela 3 apresenta alguns dos ensaios e valores limites contidos nesta resolução.

Em novembro de 2006 foi publicada a norma ABNT NBR 15422 que trata da “Especificação de óleo vegetal isolante novo”. Esta norma foi elaborada com base no estudo realizado pela força tarefa FT-02 do grupo GT D1.01 do CIGRÉ, responsável pela definição dos ensaios de aceitação deste novo fluido e na norma ASTM D6871-03. Os OVIs novos quando ensaiados segundo os métodos indicados na norma ABNT NBR 15422, devem apresentar características com valores limites especificados na Tabela 4.

Tabela 3: Características do OMI novo.

Característica	Unidade	Método de ensaio	Valor especificado para óleo	
			Naftênico	Parafínico
Aspecto	-	VISUAL	Claro, limpo, isento de material em suspensão ou sedimento	
Cor	-	ABNT NBR 14483	1,0 máx.	
Massa específica a 20°C	kg/m ³	ABNT NBR 7148	861 – 900	860 máx.
Viscosidade cinemática				
20°C	cSt	ABNT NBR 10441	25,0 máx.	25,0 máx.
40°C			11,0 máx.	12,0 máx.
100°C			3,0 máx.	3,0 máx.
Ponto de fulgor	°C	ABNT NBR 11341	140 mín.	
Ponto de fluidez	°C	ABNT NBR 11349	- 39 máx.	-12 máx.
Rigidez dielétrica				
Eletrodo de disco	kV	ABNT NBR 6869	30 mín.	
Eletrodo de calota		ABNT NBR IEC 60156	42 mín.	
Rigidez dielétrica a impulso	kV	ASTM D 3300	145 mín.	
Fator de perdas dielétricas				
25°C	%	ABNT NBR 12133	0,05 máx.	
90°C			0,40 máx.	
100°C			0,50 máx.	
Enxofre corrosivo	-	ABNT NBR 10505	Não corrosivo	
Índice de neutralização	mg KOH/g de óleo	ABNT NBR 14248	0,03 máx.	
Teor de água	mg/kg	ABNT NBR 10710 B	35 máx.	
Bifenila policlorada (PCB)	mg/kg	ABNT NBR 13882	Não detectável	
Cloretos e sulfatos	-	ABNT NBR 5779	Ausente	
Aditivo inibidor de oxidação DBPC				
Óleo não inibido	% massa	ABNT NBR 12134 A	Não detectável	
Óleo com traços de inibidor			0,08 máx.	
Óleo inibido			0,33 máx.	
Tensão interfacial a 25°C	e/m ou dina/cm	ABNT NBR 6234	40 mín.	
Estabilidade à oxidação				
Índice de neutralização	mg KOH/g de óleo	ABNT NBR 10504	0,40	
Borra	% massa		0,10	
Fator de perdas dielétricas a 90°C	%		20	

Fonte: Adaptado da Resolução número 36 da ANP de 2008 (ANP, 2008).

Tabela 4: Características do OVI novo (ABNT NBR 15422, 2006).

Características	Unidade	Método de ensaio	Valor especificado
Aspecto visual	-	-	O óleo deve ser claro, límpido e isento de materiais em suspensão
Cor	-	ABNT NBR 14483	1,0 máximo
Densidade relative a 20/4°C	-	ABNT NBR 7148	0,96 máximo
Viscosidade cinemática			
20°C	cSt	ABNT NBR 10441	150 máximo
40°C			50 máximo
100°C			15 máximo
Ponto de fulgor	°C	ABNT NBR 11341	275 mínimo
Ponto de combustão	°C	ABNT NBR 11341	300 mínimo
Ponto de fluidez	°C	ABNT NBR 11349	- 10 máximo
Rigidez dielétrica			
Eletrodo de disco	kV	ABNT NBR 6869	30 mínimo
Eletrodo de calota		ABNT NBR IEC 60156	42 mínimo
Rigidez dielétrica a impulso	kV	ASTM D 3300	130 mínimo
Fator de perdas dielétricas			
25°C	%	ABNT NBR 12133	0,20 máximo
90°C			3,6 máximo
100°C			4,0 máximo
Enxofre corrosivo	-	ABNT NBR 10505	Não corrosivo
Índice de neutralização	mg KOH/g	ABNT NBR 14248	0,06 máximo
Teor de água	mg/kg	ABNT NBR 10710 B	200
Teor de PCB (bifenila policlorada)	mg/kg	ABNT NBR 13882	Não detectável

Fonte: ABNT NBR 15422, 2006.

Na seqüência, estão descritos alguns dos ensaios físico-químicos e seu significado. Os procedimentos e métodos utilizados para o OVI são os mesmos que para o OMI.

Ponto de fluidez

O ponto de fluidez do óleo isolante é importante como índice da temperatura mais baixa na qual o material pode ser esfriado sem limitar seriamente seu grau de circulação no equipamento. Alguns fluidos à base de óleo vegetal são sensíveis ao armazenamento prolongado em baixas temperaturas e seus pontos de fluidez podem não prognosticar adequadamente suas propriedades de escoamento em baixas temperaturas.

Fator de perdas dielétricas

Um baixo fator de perdas dielétricas indica baixo grau de contaminantes solúveis. Os OVIs têm, normalmente, fatores de perdas dielétricas mais altos do que os OMIs, especialmente em elevadas temperaturas.

Teor de água

É necessário um baixo teor de água para o OVI apresentar características adequadas de rigidez dielétrica e baixa perda dielétrica, de modo a aumentar a vida do sistema isolante e minimizar a corrosão metálica. A quantidade de água exigida para saturar o OVI à temperatura ambiente é aproximadamente 20 vezes a do OMI, que por sua natureza química apresenta menor teor de água que o OVI.

Índice de neutralização

É necessário um baixo teor de acidez total do fluido isolante à base de óleo vegetal para minimizar a condução elétrica e corrosão metálica e aumentar a vida do sistema isolante. Os índices de neutralização típicos dos fluidos isolantes à base de

óleo vegetal são normalmente mais altos do que os do OMI. OVIs tendem a formar longas cadeias de ácidos graxos enquanto que o óleo mineral tende a formar ácidos orgânicos de cadeia curta.

Alguns ensaios característicos para OMI não estão contemplados na norma ABNT NBR 15422 como o ponto de anilina e a tensão interfacial. O ponto de anilina do OVI depende do tipo de matéria prima utilizada (ABNT NBR 15422, 2006).

Os critérios de desempenho da tensão interfacial para o OVI estão sendo avaliados, portanto, os requisitos ainda não foram estabelecidos. A tensão interfacial do óleo vegetal novo, tipicamente na faixa de 26 mN/m a 30 mN/m, é mais baixa que a do OMI novo, cerca de 40 mN/m (ABNT NBR 15422, 2006).

Os requisitos para estabilidade à oxidação e métodos de ensaios apropriados para o OVI ainda não foram estabelecidos. Os critérios de desempenho da estabilidade à oxidação estão sendo avaliados, e podem diferir para equipamentos com sistemas selados, conservadores ou sistemas abertos, principalmente pela tendência a oxidação dos óleos vegetais em presença de oxigênio (ABNT NBR 15422, 2006).

E, também, não há referências bibliográficas reportando se a oxidação destes óleos segue o mesmo comportamento dos óleos vegetais comestíveis, pois aditivos antioxidantes podem ter sido adicionados para melhorar a sua resistência à oxidação.

O período de permanência de óleos e gorduras vegetais em prateleira é determinado a partir da estabilidade a oxidação, determinada pelo método

condutivimétrico. Na força tarefa de “Óleos vegetais isolantes” (FT – 02) do grupo de trabalho de líquidos isolantes GT D1.01 do CIGRÉ foi apresentado um relatório técnico onde foi utilizado o método condutivimétrico para avaliar a sua estabilidade a oxidação(WILHELM & STOCCO, 2007). Neste trabalho, os autores concluíram que este método condutivimétrico pode ser utilizado como ferramenta analítica para análise comparativa da estabilidade à oxidação destes materiais.

2.1.4 Papel Isolante elétrico

A celulose, mostrada esquematicamente na Figura 13, sob a forma de papel ou papelão isolante elétrico (papel Kraft, papelão Kraft, papel manilha e papelão com fibra de algodão), tem sido largamente utilizada nos transformadores como isolante sólido. A sua escolha foi estabelecida universalmente em função de alguns parâmetros, como por exemplo, o seu baixo custo e fácil obtenção, além de suas boas propriedades elétricas e mecânicas quando imersa no óleo isolante (MORAIS, 1990 e MILASH, 1984).

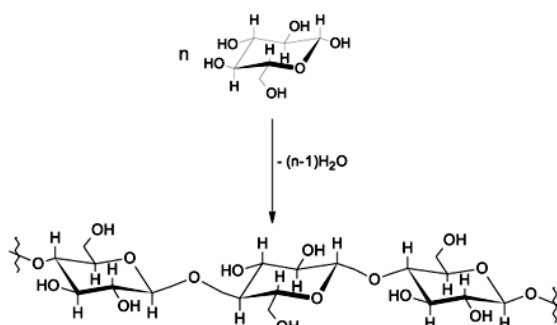


Figura 13: Representação esquemática da estrutura da celulose formada pela união de unidades de β -D-glucose.

FONTE: Adaptado de MORAIS, 2005.

O papel Kraft é utilizado na forma de finas camadas, envolvendo os enrolamentos ou na forma de espaçadores e tubos de alta densidade, para promover o isolamento entre cargas de tensão e entre fases. Nas buchas cerâmicas capacitivas e não-capacitivas de alta tensão, é usado papel impregnado com óleo ou resina. Nas buchas de menores tensões podem ser utilizados materiais cerâmicos ou poliméricos (MILASH, 1984).

Durante a fabricação do papel, a celulose é quimicamente tratada para reduzir a quantidade de ligninas e pentoses (hemiceluloses) a ela associada. No processo Kraft, a madeira é tratada com uma mistura de NaOH e Na₂SO₄. Depois do tratamento, a composição química do papel é de cerca de 89% de celulose, 7 a 8% de pentoses e 3 a 4% de ligninas (PABLO & PAHLAVANPOUR, 1997). O papel Kraft neutro, isento de metais e de outros materiais condutores de eletricidade, caracteriza-se por apresentar elevada resistência mecânica e elétrica (PIHARY, 1986).

Assim, o papel Kraft é formado por fibras de celulose (Figura 4) extraídas principalmente da madeira. As fibras são formadas por moléculas de diferentes comprimentos, unidas por ligações de hidrogênio entre os grupamentos hidroxila (PIHARY, 1986 e VÁSQUES, 1977).

O comprimento médio das moléculas de celulose pode ser determinado em termos do Grau de Polimerização (GP), o qual exprime o número médio de unidades de glucose por cadeia de celulose, situando-se na faixa entre 1000 a 1400, para o papel isolante elétrico tipo Kraft novo (SHROFF & STANNET, 1985).

O envelhecimento do isolamento sólido depende das solicitações as quais o mesmo está submetido no transformador. O processo é acelerado pelos efeitos combinados de temperatura, umidade e oxigênio. São três os mecanismos predominantes que promovem a sua deterioração em transformadores em operação (PABLO & PAHLAVANPOUR, 1997 e LEVY, RIBEIRO, NACHVALGER, *et al.*, 1994):

- a. **envelhecimento térmico:** sob ação do calor, a cadeia da celulose passa por modificações nas suas ligações produzindo cadeias menores que a original (diminuição da massa molar). Os produtos finais provenientes do envelhecimento térmico incluem água (H_2O), óxidos de carbono (CO e CO_2), hidrogênio (H_2) e compostos furânicos;
- b. **envelhecimento oxidativo:** na presença de oxigênio, as ligações intermoleculares (pontes de hidrogênio), que mantêm as cadeias poliméricas unidas tornam-se mais fracas. Os grupos hidroxila reagem convertendo-se em grupos carbonila (aldeídos e cetonas) e carboxila (ácidos). O enfraquecimento das ligações glucosídicas pode levar a cisão da cadeia polimérica. No processo de oxidação são produzidos CO , CO_2 e H_2O que contribuem numa reação secundária de hidrólise;
- c. **envelhecimento hidrolítico:** a água e os ácidos afetam a ligação glucosídica, causando ruptura de cadeia. O resultado é o encurtamento da cadeia polimérica (diminuição da massa molar) com o conseqüente enfraquecimento das fibras, desidratação e formação de compostos furânicos.

Em todos os casos, a taxa aceitável de decréscimo no GP da celulose é de 5 a 10% do seu valor inicial (SHROFF & STANNET, 1985 e YUE, ZHUXIAO & JIAXIANG, 1988).

A umidade é um agente poderoso no envelhecimento precoce do papel e, mesmo após o emprego dos métodos de secagem em uso, não existe ainda procedimento técnico para eliminá-la totalmente (BOGNAR, KALOCSAI, CSPES, *et al.*, 1990).

Para garantir o bom desempenho elétrico do sistema papel/OMI e reduzir o envelhecimento, a umidade deve ser mantida preferencialmente abaixo de 0,5% no papel e de 20 mg/kg ou menos no óleo (KARSAI, KERENYI & KISS, 1987).

2.1.4.1 Envelhecimento do sistema isolante papel/OMI

FABRE e PICHON (1960) analisaram a influência dos agentes de degradação (temperatura, umidade e oxigenação) no comportamento do papel Kraft isolante e a aplicabilidade dos resultados nos transformadores. O sistema isolante papel/OMI foi submetido ao envelhecimento térmico acelerado nas temperaturas de 90, 100, 115, 130 e 140 °C em recipientes de vidros selados. Como parâmetro de monitoramento da degradação foi utilizado o valor revelado do GP, sendo observado decréscimo deste em função da temperatura. A ação do oxigênio foi avaliada utilizando vidro não-selados. Os resultados indicaram um envelhecimento de 2,5 vezes mais rápido comparativamente ao sistema papel/OMI selados. Em relação à umidade, os resultados mostraram que a degradação térmica do papel ocorreu mais rapidamente quando os seus teores de água foram altos.

Em função da dificuldade na amostragem do papel, a dosagem de produtos oriundos da degradação da celulose é o método mais adequado para inferir sobre a qualidade do papel isolante. São descritas na literatura diferentes relações matemáticas entre a evolução de compostos furânicos no óleo isolante, o decréscimo dos valores do GP e a resistência mecânica do papel nos sistemas isolantes papel/óleo (DARVENIZA, HILL, LE & SAHA, 1991 e STEBBINS, MYERS & SHKOLNIK, 2003). Estas relações são aceitas pelo setor elétrico, mas não completamente confirmadas cientificamente a partir de amostras reais.

Dentro deste âmbito, o monitoramento da qualidade do papel isolante também pode ser realizado pela análise do isolamento líquido pela dosagem de compostos furânicos (CF), sabendo que estes compostos são gerados exclusivamente a partir da degradação do papel (material celulósico).

O composto químico 2-furfuraldeído (2-FAL) foi proposto na literatura como o principal subproduto da degradação dos materiais celulósicos (madeira e papel Kraft), utilizados como isolantes nos sistemas de enrolamento e em suportes de bobinas na maioria dos transformadores elétricos. Assim, o monitoramento contínuo da concentração de 2-FAL tem sido usado como indicador do envelhecimento do papel isolante em transformadores de potência.

A determinação do teor de 2-FAL pode ser realizada por técnica espectrofotométrica ou cromatográfica. O único método padronizado e mundialmente aceito para determinação quantitativa do teor de 2-FAL em óleo isolante proveniente da degradação do papel isolante é a cromatografia em fase líquida de alta eficiência (CLAE) (ASTM D 5837). A partir deste método é possível quantificar além do 2-FAL, outros quatro derivados furânicos provenientes da

degradação do papel isolante (Figura 13), a saber, álcool furfurílico, 5-hidroximetil-2-furfuraldeído (5-HMF), 5-metil-2-furfuraldeído (5-MF) e acetil furano (UNSWORTH & MITCHELL, 1990).

Mais recentemente, BATISTA e colaboradores desenvolveram e validaram uma metodologia colorimétrica para analisar os compostos furânicos formados a partir da degradação do papel Kraft isolante em OMI. (BATISTA, PATRIARCA, TRINDADE, *et al.*, 2008)

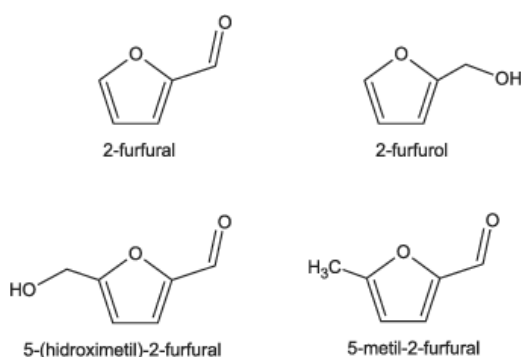


Figura 14: Compostos furânicos produzidos na degradação da celulose do papel de isolamento dos transformadores e detectáveis no óleo isolante.

Experimentos realizados por SCHEIRS e colaboradores, mostraram que ocorreu uma queda mais acentuada no GP do papel Kraft isolante envelhecido em laboratório, em OMI, sob atmosfera inerte, em temperatura próximas de 100 °C. Esta temperatura coincide com a formação de óxidos de carbono, metano, etano, água e compostos furânicos. Também, foi mostrado que o papel, e não o OMI, é a principal fonte de CO, CO₂ e H₂O nos equipamentos isolados a estes materiais (SCHEIRS, CAMINO, AVIDANO, *et al.*, 1998)

Outros estudos realizados por LEVCHIK e colaboradores, mostraram que ocorreu um aumento na concentração dos compostos furânicos em função da

temperatura e que estes foram formados pela degradação do papel e difundindo-se pelo óleo. Estes pesquisadores também mostraram que o 2-FAL e o 5-HMF foram os dois principais compostos furânicos oriundos da degradação do papel Kraft isolante, e que a concentração de 2-FAL no OMI foi maior comparativamente à concentração do 5-HMF. (LEVCHIK, SCHEIRS, CAMINO, *et al.*, 1998). Resultados semelhantes foram obtidos por BATISTA (BATISTA, 2005).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

O OMI utilizado nesta pesquisa foi denominado de OMI e adquirido do representante de vendas.

Os óleos vegetais estudados nesta pesquisa foram denominados de OV-1, OV-2, OV-3 e OV-4, sendo adquiridos de estabelecimentos comerciais distintos. Os óleos vegetais foram utilizados da forma como foram recebidos, ou seja, não foram submetidos a tratamentos químicos a não ser secos, dependendo do ensaio realizado.

Os OVIs comerciais utilizados neste estudo foram denominados por OVI-A e o OVI-B, sendo adquiridos das empresas fabricantes. Os óleos vegetais isolantes foram utilizados da forma como foram recebidos.

3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS DIFERENTES ÓLEOS UTILIZADOS

Os óleos vegetais OV-1, OV-2, OV-3 e OV-4, avaliados como potenciais fluidos isolantes, foram caracterizados por meio dos ensaios descritos na norma ABNT NBR 15422 (Tabela 2), que trata da especificação de OVI novo. Os OVIs comerciais, OVI-A e OVI-B foram caracterizados da mesma forma

O OMI foi caracterizado, atendendo as exigências da Resolução ANP nº 36 de 05.12.2008.

A relação dos equipamentos utilizados na realização destes ensaios encontra-se na Tabela 5.

Tabela 5: Relação de ensaios realizados nos óleos e equipamentos utilizados.

Ensaio	Equipamento
Densidade	Anton Paar, DMA 48
Ponto de fluidez	Marconi, modelo MAE 184
Ponto de fulgor	Solotest, Cleveland
Ponto de combustão	Solotest, Cleveland
Viscosidade cinemática	Banho Precilabo Haake DL30 coluna Schott Geräte tipo Cannon Fenske
Cor	Fisher 13-449
Teor de água	Baur, KFM 1000
Rigidez dielétrica	Baur, DTA
Fator de perdas dielétricas	Tettex AG Instruments
Tensão Interfacial	Krüst K10ST

3.3 ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO, EM ESCALA LABORATORIAL, DOS DIFERENTES ÓLEOS UTILIZADOS

Foram realizados ensaios de envelhecimento acelerado dos óleos vegetais OV-1, OV-2 e OV-3 e OVIs comerciais (OVI-A e OVI-B). Para tanto, 800 ml foram aquecidos a 95 °C em um banho termostatizado da marca Marconi, sob fluxo constante de oxigênio (1 L/h), na presença de cobre metálico (3 m de fio de um 1 mm de diâmetro), por um período de 103 h, tempo este que coincidia com 2 retiradas diárias de 100 ml dos óleos em horário comercial. Amostras de óleo foram

retiradas em intervalos regulares de tempo para monitorar seu envelhecimento por meio de análises físico-químicas.

Por apresentar valores físico-químicos fora dos parâmetros estipulados pela ABNT NBR 15422 devido, principalmente, a sua alta viscosidade, optou-se por descartar o óleo de OV-4 dos ensaios de envelhecimento acelerado.

Devido ao alto teor de água encontrado nos óleos de OV-1, OV-2 e OV-3, um procedimento foi utilizado anteriormente ao ensaio de envelhecimento: secagem por contato utilizando sílica gel pelotizada como agente secante, na proporção de 1 g de sílica para 100 ml de óleo, sob agitação constante de 500 rpm, durante 6 horas.

3.4 AVALIAÇÃO DE ADITIVOS NA ESTABILIDADE TÉRMICA E OXIDATIVA DOS ÓLEOS VEGETAIS OV-1, OV-2 E OV-3

Com a finalidade de retardar a oxidação lipídica de óleos, gorduras e alimentos gordurosos, foram adicionados aos óleos OV-1, OV-2 e OV-3 compostos químicos conhecidos como antioxidantes.

Para analisar a estabilidade à oxidação dos diferentes óleos foi utilizada a norma Européia BS EN 14112 que trata da determinação da estabilidade à oxidação pelo método Rancimat.. O método do Rancimat baseia-se no arraste dos ácidos voláteis, produzidos no decorrer do aquecimento do óleo, sob fluxo de ar ambiente seco para um frasco contendo água destilada e um eletrodo condutivimétrico.

Foram utilizados nessa pesquisa 06 aditivos largamente empregados na indústria de óleos vegetais, sendo 01 aditivo primário fenólico natural, 03 aditivos

primários fenólicos artificiais, 01 aditivo removedor de oxigênio e 01 aditivo quelante, este último, usado na aditivação de biodiesel.

Esses seis aditivos foram misturados aos óleos vegetais OV-1, OV-2 e OV-3. Como ainda não existe normatização para a aditivação do OVI, a concentração utilizada baseou-se na resolução nº 36 de 5/12/2008 da ANP (Agência Nacional de Petróleo) que estabelece 3000 ppm como a concentração máxima para o aditivo inibidor no OMI.

Devido ao alto teor de água encontrado nos óleos de OV-1, OV-2 e OV-3, um procedimento foi utilizado anteriormente à adição dos aditivos antioxidantes: secagem por contato utilizando sílica gel pelotizada como agente secante, na proporção de 1 g de sílica para 100 ml de óleo sob agitação constante de 500 rpm, durante 6 h. Os óleos assim secos foram aditivados com os 06 aditivos denominados de AD-1, AD-2, AD-3, AD-4, AD-5 e AD-6, e tiveram sua estabilidade à oxidação determinada pelo método do Rancimat, a temperatura de 130 °C, com 1,5 l/h de fluxo de oxigênio para uma amostragem de 30 g de óleo.

Na seqüência, foi selecionado o aditivo antioxidante que proporcionou aos óleos vegetais a melhor resposta frente ao ensaio do Rancimat. Este aditivo foi adicionado aos óleos OV-1, OV-2 e OV-3, previamente secos, na concentração de 3000 ppm, sendo realizados nestes óleos aditivados ensaios de envelhecimento acelerado, a 95 °C por 103 horas, com borbulhamento de oxigênio com fluxo de 10 L/h. Após o envelhecimento, foram realizados ensaios de fator de perdas dielétricas a 90 °C (IEC 247), viscosidade cinemática a 40 °C (ABNT NBR 10441) e índice de neutralização (ABNT NBR 14248) em alíquotas destes óleos. Estes resultados foram comparados aos obtidos para os OVIs comerciais, OVI-A e OVI-B,

que foram envelhecidos nas mesmas condições e comparados também, com os resultados obtidos para os óleos sem aditivação (Item 3.3).

3.5 ENSAIO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO DO PAPEL KRAFT ISOLANTE NOS DIFERENTES ÓLEOS

Para avaliar a influência das diferentes naturezas químicas dos óleos vegetais no processo de envelhecimento acelerado do papel Kraft isolante, amostras deste papel foram dispostas dentro dos respectivos fluidos vegetais em estudo (OV-1, OV-2 e OV-3). Paralelamente, o OMI e os OVIs comerciais (OVI-A e OVI-B) foram ensaiados nas mesmas condições. Foi avaliado o efeito da temperatura e da natureza química do fluido no processo de envelhecimento do papel, pelo monitoramento dos compostos furânicos (ASTM D 5837) e do GP do papel (IEC 450).

Amostras de 800 ml dos óleos (OMI, OVI-A, OVI-B, OV-1, OV-2 e OV-3) foram colocadas para envelhecer a 95, 130 e 140 °C, sob fluxo constante de oxigênio (1 l/h), na presença de cobre metálico (3 m de fio de um 1 mm de diâmetro) e de papel Kraft isolante (21,6 g), por 103 h. Amostras de óleo e do papel foram retiradas em intervalos regulares de tempo para monitorar a degradação do papel Kraft pelos ensaios de determinação de compostos furânicos, por cromatografia em fase líquida, em um cromatógrafo com detector de rede de diodo DIONEX, modelo PD 40 e, pela determinação do GP.

Para a monitoração dos compostos furânicos ficou estabelecida a quantificação do 2-furfuraldeído (2-Fal), pois este vem sendo o parâmetro utilizado para monitorar a degradação do papel em OMI. A extração dos compostos furânicos

foi realizada misturando-se 6 ml da amostra de cada óleo com 4 ml de solução de metanol 25%, sob agitação constante por 10 minutos, em rotação de 180 rpm. A mistura foi, então, centrifugada 2 vezes por 10 minutos com rotação de 270 rpm e separada por decantação em funil de separação. Foi injetado no cromatógrafo 20 μ L da amostra, tendo como eluente solução de Acetonitrila a 20%.

As Figuras 15 e 16 ilustram os ensaios de envelhecimento acelerado, realizados a 95, 130 e 140 °C.



Figura 15: Amostras dos óleos com papel Kraft isolante antes do ensaio de envelhecimento acelerado a 95, 130 e 140 °C.



Figura 16: Ensaio de envelhecimento acelerado do papel Kraft isolante no óleo, realizado em banho termoestabilizado a 95, 130 e 140 °C, com borbulhamento de oxigênio.

3.6 AVALIAÇÃO DA FORMAÇÃO DE GASES DISSOLVIDOS NOS DIFERENTES ÓLEOS APÓS APLICAÇÃO DE DIFERENTES CARGAS DE ESFORÇO ELÉTRICO

Para calcular a quantidade de gás dissolvido em um óleo, por cromatografia em fase gasosa, é necessário conhecer primeiramente o coeficiente de solubilidade de Ostwald do gás de interesse no óleo em análise.

O coeficiente de solubilidade dos gases nos óleos vegetais OV-1, OV-2 e OV-3 foi determinado com base nos procedimentos descritos na norma ASTM D 2780. Foi determinado o coeficiente para os seguintes gases: nitrogênio, oxigênio, hidrogênio, etano, etileno, acetileno, dióxido de carbono, monóxido de carbono e metano.

Para determinar o coeficiente de solubilidade de Ostwald o gás padrão de interesse foi borbulhado durante 50 minutos em 200 ml do óleo vegetal em estudo,

inseridos em frasco apropriado, a temperatura ambiente, a partir do uso de uma pedra difusora. Após o borbulhamento, amostras de óleo foram coletadas (40 ml) em seringas com capacidade para 50 ml, e submetidas ao processo de extração de gases usando um extrator apropriado, em concordância com os procedimentos descritos na norma ASTM D 3612. Durante o processo de extração as amostras foram submetidas a $2,0 \cdot 10^{-1}$ mbar de vácuo, sob agitação magnética por 2 minutos, a temperatura ambiente.

Para determinar o coeficiente de solubilidade de Ostwald foi medido o volume de gás extraído, bem como o volume de óleo injetado no extrator, conforme descrito na Equação 1.

$$\text{Coeficiente de Solubilidade de Ostwald} = \frac{\text{Volume de Gás Extraído (ml)}}{\text{Volume de Óleo Injetado (ml)}} \quad \text{Equação 1}$$

Visando a geração de gases dissolvidos de forma acelerada, foram aplicados nos óleos vegetais OV-1, OV-2 e OV-3, OVI-A, OVI-B e OMI diferentes cargas de esforço elétrico e térmico.

Para avaliar o esforço elétrico foram aplicadas descargas disruptivas em torno de 40 kV, utilizando uma cuba aberta com eletrodos planos, espaçados de 2,5 mm. Em cada óleo testado (400 ml) foram aplicadas 15, 45, 75 e 105 descargas, sendo que, após cada intervalo de descarga foram retiradas alíquotas do óleo (40 ml) para posterior análise de gases dissolvidos, por cromatografia em fase gasosa.

Para avaliar o esforço térmico, os óleos foram acondicionados em estufa, a 150 °C, em frascos âmbar, fechados, com capacidade para 250 ml. Alíquotas de 40

ml de cada óleo foram retiradas em intervalos regulares de tempo para posterior análise de gases dissolvidos, por cromatografia em fase gasosa.

A determinação dos gases dissolvidos nos diferentes óleos que foram submetidos, tanto ao esforço elétrico quanto ao térmico, foi realizada por cromatografia em fase gasosa de acordo com a metodologia descrita na norma ABNT NBR 7070.

Para quantificação dos gases dissolvidos gerados nos óleos OV-2, OV-3, e OVI-B, foram utilizados os coeficientes de solubilidade de Ostwald, determinados nessa pesquisa. Por apresentarem a mesma matriz de óleo foram utilizados para o OV-1 os coeficientes fornecidos pelo fabricante do OVI-A, enquanto que para o OMI foram utilizados os coeficientes descritos na norma ABNT NBR 7070.

3.7 REALIZAÇÃO DE ENSAIOS ELÉTRICOS EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO PREENCHIDOS COM OS DIFERENTES ÓLEOS

Foram adquiridos 06 transformadores de distribuição novos para realização de testes de desempenho dos óleos vegetais OV-1, OV-2 e OV-3 como fluidos isolantes, em escala laboratorial e em campo. Os ensaios em laboratório foram realizados nas instalações do fabricante e do LACTEC. Após estes ensaios, os transformadores foram instalados na concessionária, na regional de Cascavel. Os transformadores instalados em campo continuam em operação, com acompanhamento técnico periódico, para que a partir destes dados, o real desempenho em campo possa ser comprovado e divulgado.

Primeiramente, os óleos vegetais OV-1, OV-2 e OV-3, foram aditivados com o aditivo AD-4. Para a aditivação, o aditivo foi pré-solubilizado no óleo em laboratório,

sendo esta solução, na seqüência, adicionada ao óleo do tambor. Os óleos assim aditivados, o OVI-A, o OVI-B e o OMI foram enviados para a fábrica dos transformadores para enchimento dos 06 transformadores de classe 15 kV, de potência nominal igual a 75 kVA. Os transformadores foram identificados pelo número de série e pelo respectivo líquido isolante, conforme segue:

- número de série 0942984: preenchido com OV-1;
- número de série 0942988: preenchido com OV-2;
- número de série 0942986: preenchido com OV-3;
- número de série 0942985: preenchido com OVI-A;
- número de série 0942983: preenchido com OVI-B;
- número de série 0942987: preenchido com OMI.

Foram realizados na fábrica ensaios de rotina nestes transformadores. Após a aprovação desses ensaios, os equipamentos foram entregues para os ensaios de rotina, elevação de temperatura, resistência de isolamento, tensão de rádio interferência, fator de potência do isolamento, ensaio de tensão de impulso atmosférico, tensão aplicada e tensão induzida.

3.7.1 Ensaios de Elevação de Temperatura

Os 06 transformadores foram submetidos ao ensaio de elevação de temperatura de acordo com a norma ABNT NBR-5356 – parte 3 de 2007. Com este experimento foi possível avaliar eventuais diferenças no sistema de refrigeração dos

mesmos, causadas pelas características distintas de viscosidade de cada óleo testado. Os resultados obtidos foram comparados entre os diferentes sistemas isolantes testados e com o sistema de referência (sistema isolado a OMI).

3.7.2 Medição de Tensão de Rádio Interferência

Foi medida a tensão de rádio interferência dos 06 transformadores de distribuição de acordo com a norma ABNT NBR-5356 – parte 3 de 2007. Anteriormente às medições, foram definidos os fatores de correção de cada um dos transformadores avaliados. No processo de medição, aplicou-se 90, 100 e 110% da tensão fase-terra (8 kV) a cada um dos terminais do lado de alta tensão do transformador em teste, em degrau ascendente e descendente.

3.7.3 Medição do Fator de Potência do Isolamento

Foi medido o fator de potência do isolamento dos 06 transformadores de distribuição de acordo com a norma ABNT NBR-5356 – parte 3 de 2007 sendo testadas as seguintes isolações: CH, CX e CHX.

Durante os ensaios o terminal de alta tensão do transformador foi energizado com tensão de 2,5 kV e o lado de baixa com tensão igual a 500 V.

3.7.4 Ensaio de Impulso Atmosférico

Para cada transformador, os terminais H1, H2 e H3 foram ensaiados com a seguinte seqüência de impulsos atmosféricos de polaridade negativa, com forma de onda 1,2/50 μ s, conforme estabelece a norma ABNT NBR-5356 – parte 3 de 2007.

- um impulso pleno com valor reduzido (60 kV);

- um impulso pleno com valor especificado (95 kV);
- um impulso cortado com valor reduzido (66 kV);
- dois impulsos cortados com valor especificado (105 kV);
- dois impulsos plenos com valor especificado (95 kV).

3.7.5 Ensaio de Tensão Aplicada

No enrolamento de tensão superior de cada transformador foi aplicado 34 kV aos seus terminais curto-circuitados, na frequência de 60 Hz, durante 60 s, estando todos os terminais do enrolamento de tensão inferior curto-circuitados e aterrados junto com o tanque. Para o ensaio do enrolamento de tensão inferior, utilizou-se procedimento similar, entretanto aplicando-se a tensão de 10 kV, por 60 s, conforme estabelece a norma ABNT NBR-5356 – parte 3 de 2007.

3.7.6 Ensaio de Tensão Induzida

Cada transformador foi ensaiado aplicando-se a tensão de 254 V (2 x 127 V) aos terminais de baixa tensão, com uma fonte de alimentação de frequência 240 Hz, por 30 s, conforme estabelece a norma ABNT NBR-5356 – parte 3 de 2007.

3.8 AVALIAÇÃO DA SUPORTABILIDADE DIELÉTRICA DE TRANSFORMADORES ISOLADOS COM OS ÓLEOS OV-1, OV-2 E OV-3

Foram realizados ensaios dielétricos em laboratório nos 06 transformadores de distribuição, cada qual isolado com um óleo específico, a fim de verificar eventuais diferenças de comportamento entre os diversos sistemas testados. Os resultados foram comparados entre si e com o sistema de referência, o OMI.

Antes e após os ensaios elétricos foram retiradas amostras dos óleos para avaliação dos gases dissolvidos. O ensaio de gases dissolvidos foi realizado por cromatografia em fase gasosa de acordo com a metodologia descrita na norma ABNT NBR 7070.

Para quantificação dos gases dissolvidos gerados nos óleos OV-2, OV-3 e OVI-B, foram utilizados os coeficientes de solubilidade de Ostwald, determinados neste trabalho (Item 3.6). Para o óleo OVI-A foram utilizados os coeficientes tabulados pelo fabricante do óleo OV-1 enquanto que para o OMI foram utilizados os coeficientes descritos na norma ABNT NBR 7070.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios realizados nos óleos vegetais OV-1, OV-2, OV-3 e OV-4 foram comparados aos dos OVIs comercialmente disponíveis (OVI-A e OVI-B) e ao OMI.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS ÓLEOS ISOLANTES

4.1.1 Caracterização Físico-Química do OMI

O OMI foi caracterizado conforme resolução ANP nº36 de 05.12.2008.

A Tabela 6 apresenta as características físico-químicas do OMI avaliado neste trabalho, determinadas a partir de suas análises.

Os resultados indicam que o OMI apresentou valores satisfatórios e estão dentro da especificação para fluido isolante novo, em atendimento a resolução da ANP nº 36 de 05.12.2008.

Tabela 6: Caracterização físico-química do óleo OMI.

Ensaio	Método (ABNT)	Limites		OMI
		Naftênico	Parafínico	
Análise visual	VISUAL	Claro e límpido		Claro e límpido
Índice de neutralização, (mg KOH/g óleo)	NBR 14248	0.03 máx		0,01
Teor de água (ppm, mg/kg)	NBR 10710/B	35 máx		17
Cor	NBR 14483	1,0 máx		0,0
Densidade a 20 °C, (g/ml)	NBR 7148	861-900	860 máx	0,8882
Fator de perdas dielétricas a 25 °C, (%)	NBR 12133	0,05 máx		0,004
Fator de perdas dielétricas a 100 °C, (%)	NBR 12133	0,50 máx		0,11
Ponto de fulgor, (°C)	NBR 11341	140 mín		140
Rigidez dielétrica, (kV)	NBR 6869	30 mín		47
Viscosidade a 40 °C, (cSt)	NBR 10441	11,0 máx	12,0 máx	9,97
Enxofre corrosivo	NBR 10505	Não corrosivo		Não corrosivo
Teor de PCB, (mg/kg)	NBR 13882	Não detectável		Não detectado
Ponto de fluidez, (°C)	NBR 11349	-39 máx	-12 máx	<-50
Tensão interfacial, mN/m	NBR 6234	40 mín		49,5
Teor de DBPC, %	NBR 12134 A	0,33 máx		0,30
Carbono aromático, %	ASTM D 2140			2

4.1.2 Caracterização Físico-Química dos Óleos Vegetais

Os óleos vegetais novos foram caracterizados de acordo com os ensaios descritos na norma ABNT NBR 15422 e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 7. Em comparação com o OMI, os óleos vegetais analisados (OVI-A, OVI-B, OV-1, OV-2, OV-3 apresentaram maior ponto de fulgor, da ordem de 320 °C, o que lhes conferem a característica de fluidos de segurança. Esta propriedade é importante principalmente em se tratando de equipamentos instalados em ambientes fechados, onde uma maior proteção contra incêndio é requerida. Outra característica

foi a viscosidade em torno de quatro vezes superior a do OMI, o que pode comprometer a refrigeração do transformador e a impregnação do papel Kraft isolante. O teor de umidade também superior ao do OMI pode ser explicado em função da sua maior polaridade, característica também evidenciada pelo baixo valor da tensão interfacial.

Tabela 7: Caracterização físico-química dos óleos vegetais estudados.

Ensaio	Parâmetros	Óleo Vegetal					
		OVI-A	OVI-B	OV-1	OV-2	OV-3	OV-4
Índice de neutralização, (mg KOH/g óleo)	0,06 máx	0,05	0,01	0,08	0,04	0,06	1,51
Teor de água (ppm m/m)	200	64	55	663	581	610	1400
Densidade a 20 °C, (g/ml)	0,96 máx	0,9200	0,9182	0,9205	0,9198	0,9181	0,9598
Fator de perdas dielétricas a 25 °C, (%)	0,20 máx	0,30	0,03	0,16	0,15	0,36	0,48
Fator de perdas dielétricas a 90 °C, (%)	3,6 máx	3,32	-	2,81	1,95	5,97	28,4
Fator de perdas dielétricas a 100 °C, (%)	4,0 máx	4,00	0,70	3,17	2,10	6,96	39,5
Ponto de fulgor, (°C)	275 mín	312	310	318	318	312	290
Ponto de combustão, (°C)	300 mín	346	340	352	357	350	328
Rigidez dielétrica, (kV)	30 mín	55	49	42	37	37	41
Viscosidade a 40 °C, (cSt)	50 máx	36,06	31,53	33,13	32,37	37,53	253,95
Viscosidade a 100 °C, (cSt)	15 máx	8,45	7,66	7,76	7,74	8,45	19,30
Ponto de fluidez, (°C)	- 10 máx	-21	-12	-12	-15	-6	-15
Tensão interfacial (dina/cm)*		20,9	-	20,7	26,9	23,2	14,7
Índice de refração*		1,4743	-	1,4749	1,4748	1,4725	1,4787

* Ensaio não previsto na norma ABNT NBR 15422

Os valores destacados em negrito na Tabela 7 são aqueles que estão fora dos limites estipulados na norma para OVI novo (ABNT NBR 15422). O teor de água, para os óleos OV-A, OV-2, OV-3 e OV-4, pode facilmente ser corrigido por meio de uma secagem utilizando materiais adsorventes ou termo-vácuo. O fator de perdas dielétricas, porém necessita de uma análise mais criteriosa. Para os óleos OV-3 e OV-4, este parâmetro não atendeu o valor limite determinado pela norma, em todas as temperaturas ensaiadas. Além deste parâmetro, o óleo OV-4 apresentou viscosidade e índice de neutralização superiores aos valores apresentados pelos demais óleos vegetais, portanto este óleo não foi mais utilizado na continuidade deste estudo. O ponto de fluidez também pode ser facilmente reduzido pela adição de aditivos redutores de ponto de fluidez. A tendência à “solidificação” do óleo é medida pelo ponto de fluidez, que deve ser tanto mais baixo quanto possível. O ponto de fluidez do OMI é consideravelmente inferior ao dos OVIs. Esta propriedade é importante quanto ao armazenamento dos fluidos isolantes em baixas temperaturas (da ordem de -10°C). Em temperaturas desta grandeza, para evitar o congelamento dos óleos, os tanques de armazenamento precisam ser aquecidos. Abaixamentos no ponto de fluidez, muitas vezes motivados pela aditivação de inibidores de cristalização representam menores restrições do óleo a variações de temperatura, evitando problemas de estocagem e de utilização em regiões mais frias (STOURNAS, LOIS & SERDARI, 1995 e RAMOS, 2003).

4.1.3 Caracterização do Papel Kraft Isolante

As amostras de papel Kraft isolante apresentaram, da forma como foram recebidas, teores de umidade de $\sim 5\%$ e após secagem em estufa, teores de

umidade de ~ 1,5%. O GP inicial do papel Kraft utilizado foi de 960.

4.2 ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO DOS ÓLEOS EM ESCALA LABORATORIAL

Foi realizado envelhecimento acelerado dos óleos vegetais, em escala laboratorial e após estes ensaios foram realizados o fator de perdas dielétricas, a viscosidade cinemática a 40 °C e o índice de neutralização em alíquotas destes óleos. Estes resultados foram comparados entre si e estão expressos nos gráficos mostrados nas Figuras 17, 18 e 19.

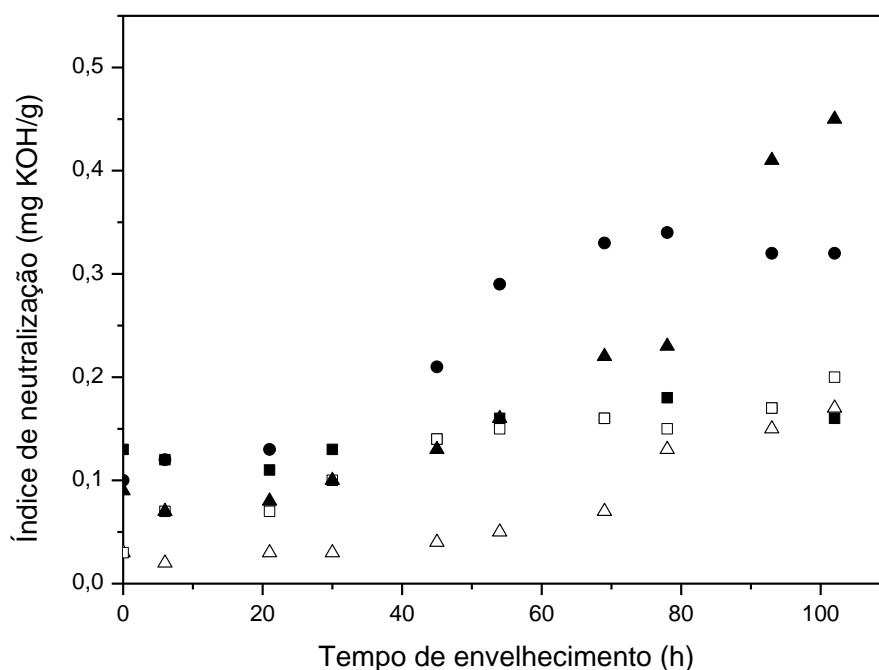


Figura 17: Efeito do envelhecimento acelerado dos óleos não-aditivados sobre o índice de neutralização: (■) OV-1; (▲) OV-2; (●) OV-3; (□) OVI-A e (△) OVI-B.

De uma forma geral, todos os óleos ensaiados apresentaram um aumento no índice de neutralização em função do tempo de envelhecimento, devido à formação

de ácidos carboxílicos e derivados na sua oxidação. Os óleos OV-2 e OVI-B apresentaram aumento maior após 90 h de envelhecimento comparado aos demais óleos.

Segundo WILHELM e colaboradores, os índices de neutralização típicos dos OVIs são normalmente mais altos do que os do OMI porque os OVIs oxidados tendem a formar longas cadeias de ácidos graxos enquanto que o OMI tende a formar ácidos orgânicos de cadeia curta, sendo estes muito mais agressivos em comparação aos primeiros. (WILHELM, GRANATO, TULIO, *et al.*, 2006)

O comportamento da viscosidade de todos os óleos foi similar com aumento gradativo durante o envelhecimento (Figura 18).

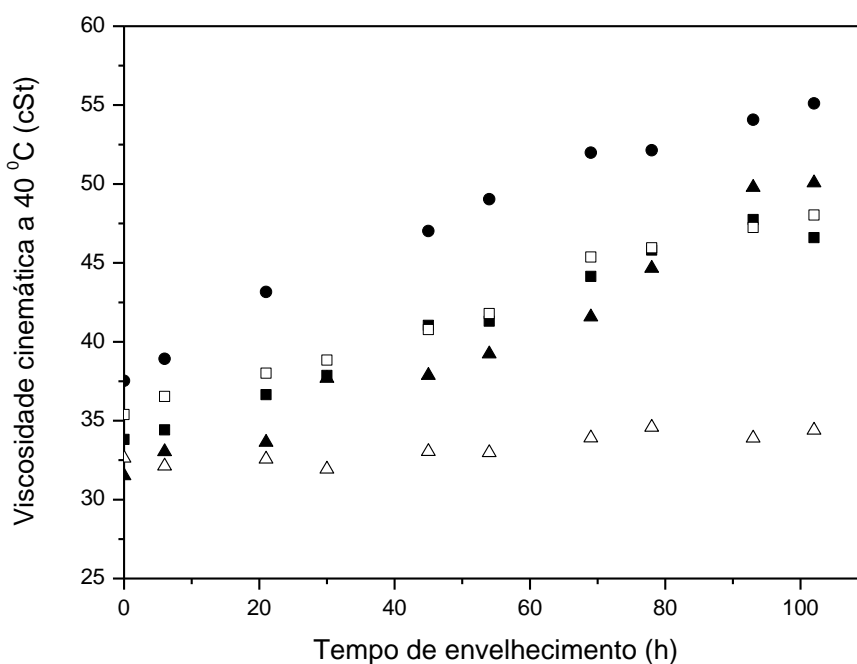


Figura 18: Efeito do envelhecimento acelerado dos óleos não-aditivados sobre a viscosidade cinemática a 40 °C: (■) OV-1; (▲) OV-2; (●) OV-3; (□) OVI-A e (△) OVI-B.

O fator de perdas dielétricas a 90 °C manteve-se praticamente constante durante o envelhecimento para os OV-2 e OVI-B e para os demais óleos houve acréscimo similar e gradativo (Figura 19), tendo o OVI-B apresentado os menores valores.

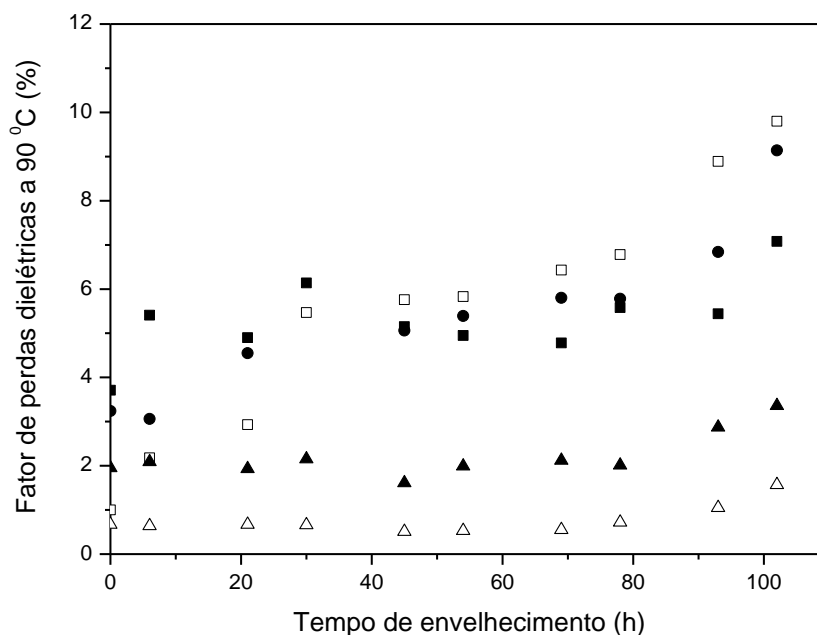


Figura 19: Efeito do envelhecimento acelerado dos óleos não-aditivados sobre o fator de perdas dielétricas a 90 °C: (■) OV-1; (▲) OV-2; (●) OV-3; (□) OVI-A e (△) OVI-B.

4.3 AVALIAÇÃO DE ADITIVOS NA ESTABILIDADE TÉRMICA DOS ÓLEOS VEGETAIS OV-1, OV-2 E OV-3

Os resultados da estabilidade à oxidação a 130 °C dos óleos OV-1, OV-2 e OV-3 aditivados com 06 diferentes tipos de antioxidantes são mostrados na Tabela 8. Baseado no ensaio de estabilidade à oxidação, pode-se afirmar que o aditivo

antioxidante que apresentou o melhor resultado foi o AD-4, pois proporcionou o maior período de indução para todos os óleos.

Tabela 8: Período de indução dos óleos aditivados OV-1, OV-2 e OV-3.

Aditivo	Período de Indução (h)		
	OV-1	OV-2	OV-3
Sem aditivação	3,1	1,3	3,1
AD-1	2,2	1,5	2,5
AD-2	2,2	1,8	3,5
AD-3	3,4	2,3	3,4
AD-4	12,5	12,1	14,6
AD-5	4,5	3,2	2,5
AD-6	10,9	4,9	12,9

Na Tabela 9, estão apresentados os períodos de indução dos óleos vegetais em estudo em comparação aos OVIs comerciais (OVI-A e OVI-B). O aditivo AD-4 proporcionou aos óleos em estudo, períodos de indução semelhantes ao do óleo comercial OVI-B.

Tabela 9: Comparativo entre o tempo de Indução dos óleos estudados aditivados com AD-4, os óleos comerciais e o OMI.

Óleo	Período de Indução (h)
OV-1 aditivado com AD-4	12,5
OV-2 aditivado com AD-4	12,0
OV-3 aditivado com AD-4	14,6
OVI-A	3,3
OVI-B	14,8

Após a aditivação dos óleos OV-1, OV-2 e OV-3 com 3000 ppm de AD-4, os mesmos foram envelhecidos a 95 °C e comparados com os resultados dos OVIs OVI-A e OVI-B. Os resultados para os ensaios de índice de neutralização, viscosidade cinemática a 40 °C e o fator de perdas dielétricas a 90 °C estão apresentados nos gráficos das Figuras 20, 21 e 22, respectivamente.

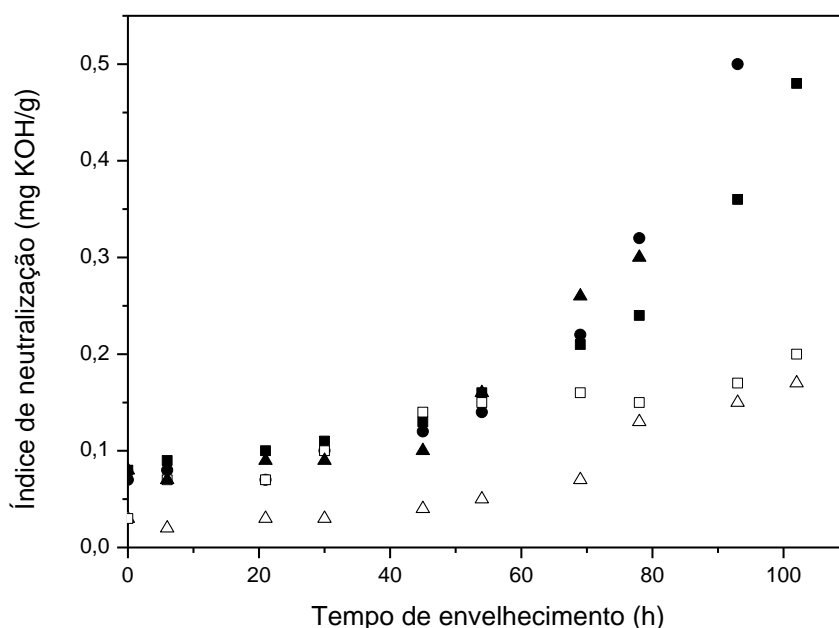


Figura 20: Efeito do envelhecimento acelerado dos óleos aditivados com AD-4 sobre o índice de neutralização: (■) OV-1; (▲) OV-2; (●) OV-3; (□) OVI-A e (△) OVI-B.

Todos os óleos ensaiados apresentaram um aumento no índice de neutralização com o aumento do tempo de envelhecimento. O índice de neutralização aumentou a partir de 70 h para todos os óleos em comparação ao óleo OVI-B, que apresentou o menor valor ao término do envelhecimento.

O comportamento da viscosidade de todos os óleos foi similar com acréscimos significativos ao final do envelhecimento, tendo o OVI-B apresentado valores constantes para este parâmetro.

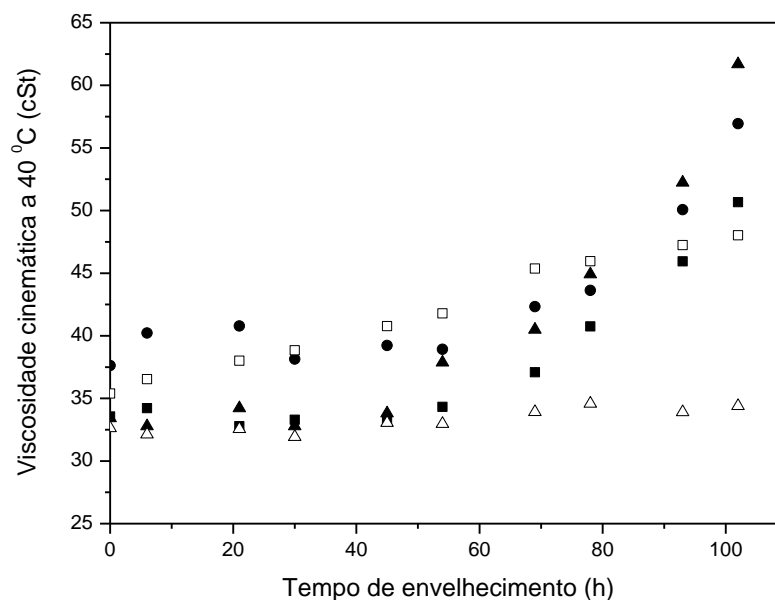


Figura 21: Efeito do envelhecimento acelerado dos Óleos aditivados com AD-4 sobre a Viscosidade Cinemática a 40°C: (■) OV-1; (▲) OV-2; (●) OV-3; (□) OVI-A e (△) OVI-B.

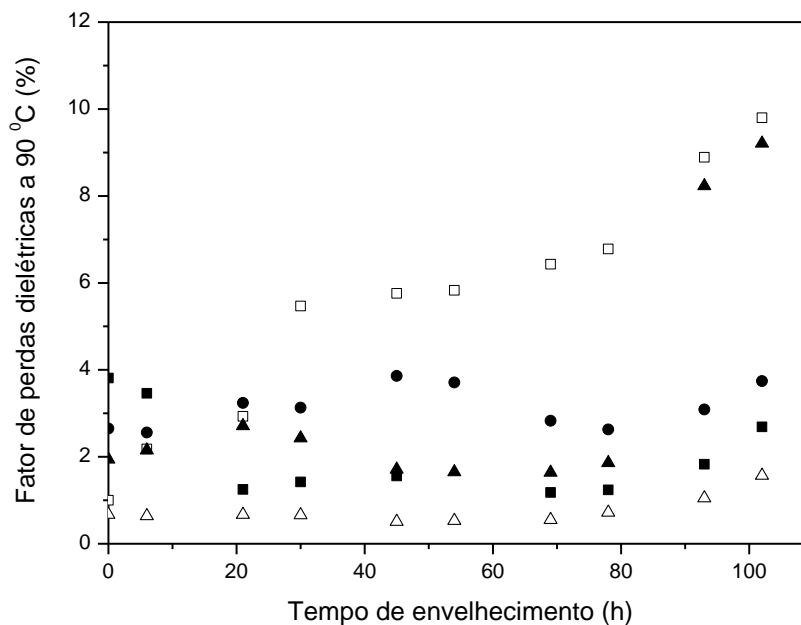


Figura 22: Efeito do envelhecimento acelerado dos Óleos aditivados com AD-4 sobre o Fator de Perdas Dielétricas a 90°C: (■) OV-1; (▲) OV-2; (●) OV-3; (□) OVI-A e (△) OVI-B.

O óleo OVI-A apresentou um aumento gradativo nas perdas dielétricas a 90 °C enquanto o óleo OV-2 apresentou aumento abrupto a partir de 80 h e ao final do envelhecimento os valores foram mais altos em relação aos demais. Os óleos OV-1, OV-2 e OVI-B mantiveram-se praticamente constantes, tendo o OVI-B apresentado os menores valores.

Os parâmetros avaliados (índice de neutralização, viscosidade a 40 °C e perdas dielétricas a 90 °C) mostraram que a aditivação com 3000 ppm do aditivo AD-4 não trouxe benefícios para os óleos durante o tempo de envelhecimento estudado (103 h) quando comparado com o desempenho dos fluidos sem adição desse aditivo. Porém, a adição do aditivo antioxidante proporcionou um aumento significativo no período de indução para os óleos OV-1, OV-2 e OV-3.

4.4 ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO SIMULADO DO PAPEL ISOLANTE NOS DIFERENTES ÓLEOS

As amostras coletadas dos óleos vegetais envelhecidas a 95 °C não apresentaram traços de 2-fal, o que não permitiu monitorar o envelhecimento do papel Kraft isolante nestes óleos nesta temperatura de realização do ensaio de envelhecimento acelerado (95 °C).

Na falta de traços de 2-fal nas amostras envelhecidas a 95 °C, optou-se por repetir o envelhecimento dos óleos, nas mesmas condições, a temperatura de 130 °C. Nesta temperatura, também não foram detectados traços de 2-fal.

Seguiu-se, então, um ensaio de envelhecimento acelerado a 140 °C, retirando amostras em intervalos regulares de tempo até o aparecimento de compostos furânicos.

Nas amostras dos óleos OV-1, OV-2, OV-3, OVI-A, OVI-B e OMI envelhecidas a 140 °C em presença de papel foi avaliada por cromatografia em fase líquida a quantidade de compostos furânicos formados durante envelhecimento, cujos resultados estão apresentados nas Figuras 23 a 27, respectivamente.

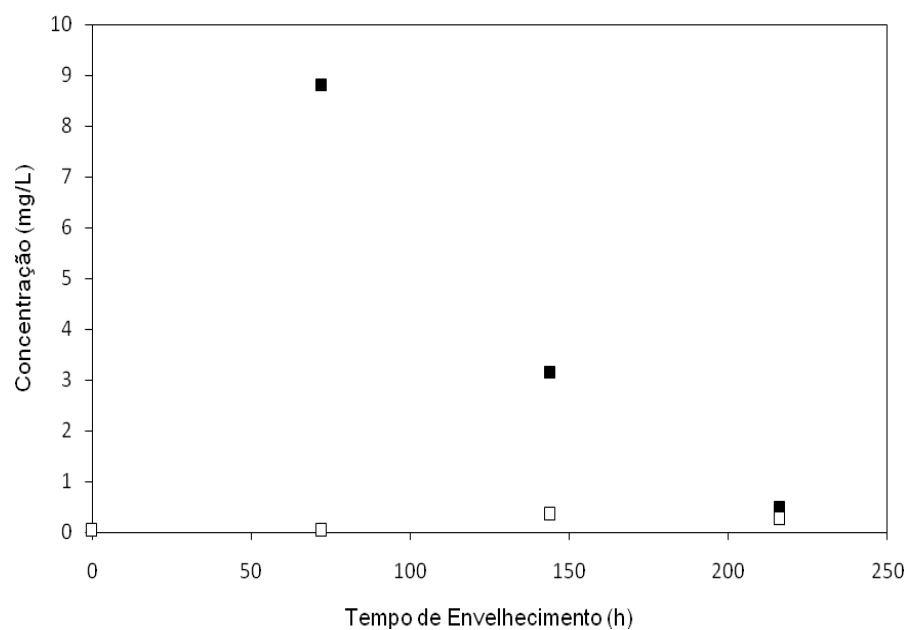


Figura 23: Compostos furânicos no óleo OV-1. ■ Álcool Furfurílico e □ 2 Furfuraldeído

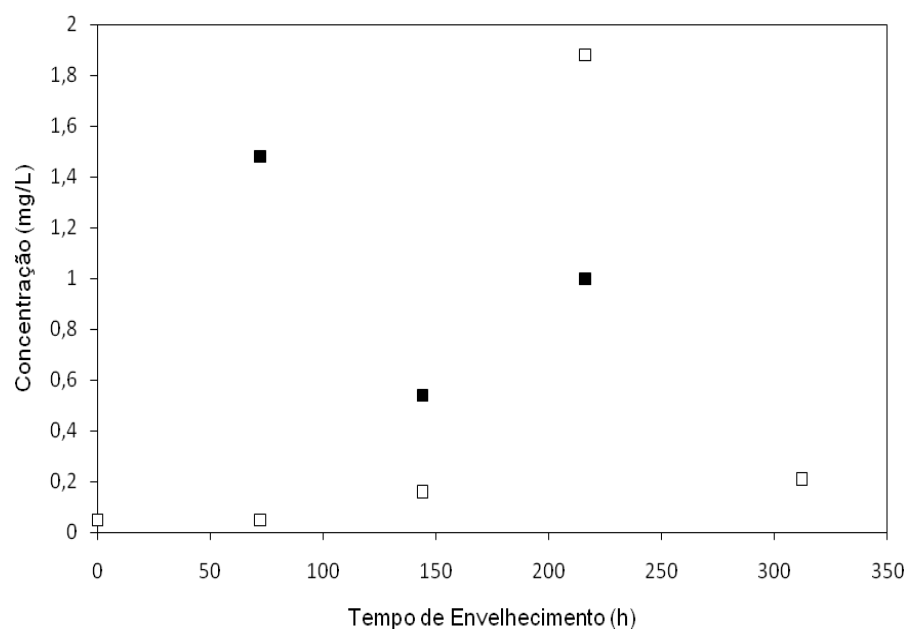


Figura 24: Compostos furânicos no óleo OV-2. ■ Álcool Furfurílico e □ 2 Furfuraldeído

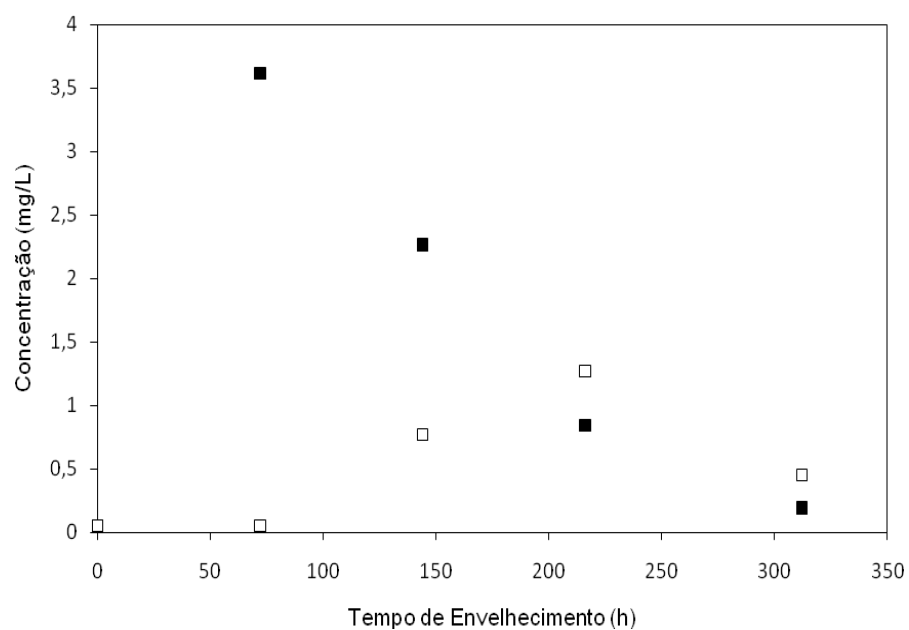


Figura 25: Compostos furânicos no óleo OV-3. ■ Álcool Furfurílico e □ 2 Furfuraldeído

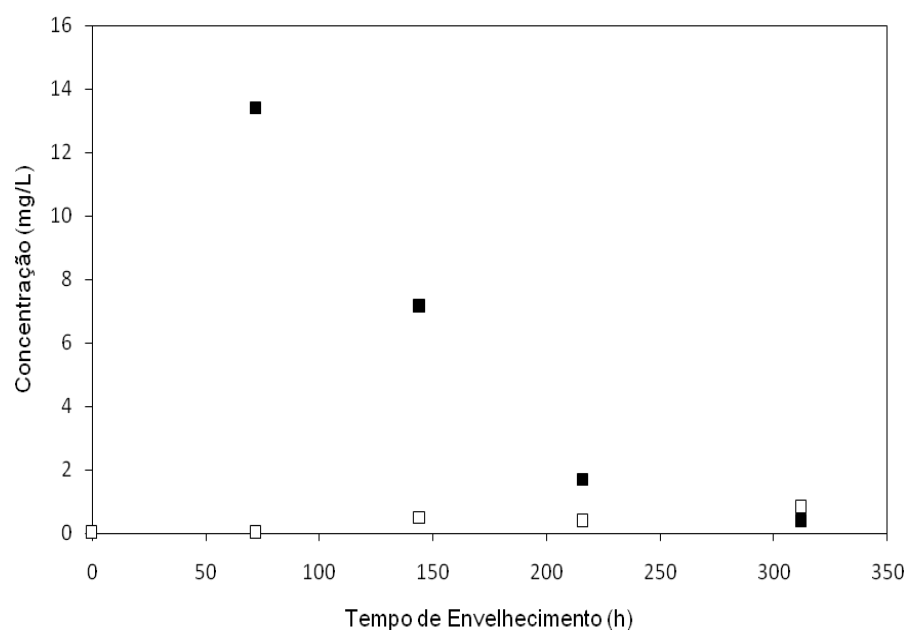


Figura 26: Compostos furânicos no óleo OVI-A. ■ Álcool Furfurílico e □ 2 Furfuraldeído

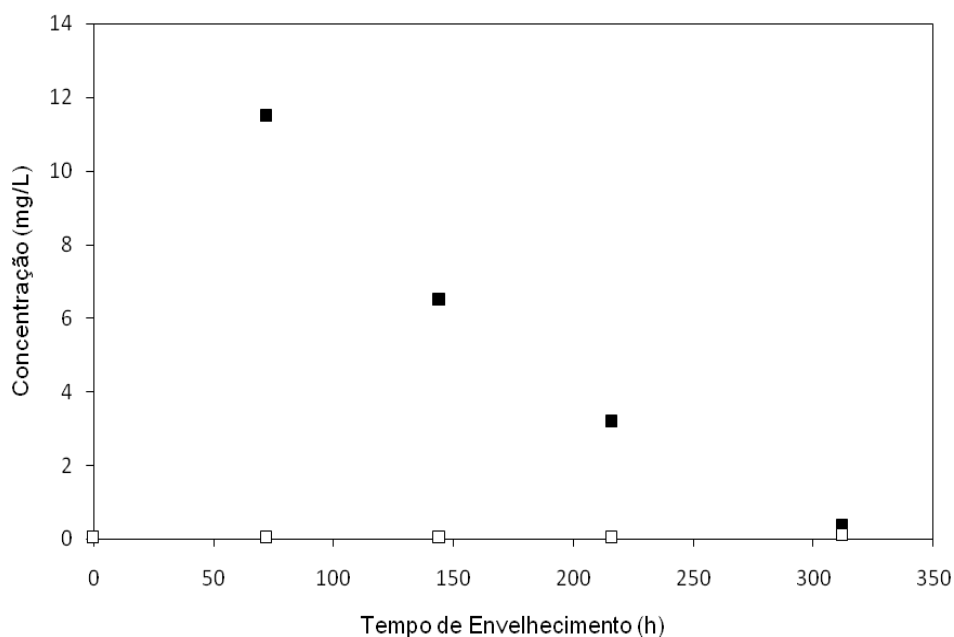


Figura 27: Compostos furânicos no óleo OVI-B. ■ Álcool Furfurílico e □ 2 Furfuraldeído

De uma forma geral, todos os óleos vegetais mostraram uma alta concentração inicial de álcool furfurílico seguido de um decréscimo acentuado com o aumento do tempo de envelhecimento. Quanto ao 2-fal, os óleos vegetais isolantes comerciais, OVI-A e OVI-B, apresentaram o mesmo comportamento, ou seja, valores constantes e próximos do limite de detecção da técnica. O OV-1 apresentou comportamento similar aos OVIs comerciais. Já os óleos OV-2 e OV-3 apresentaram aumentos significativos na concentração de 2-fal seguido de um decréscimo ao final do ensaio.

O OMI apresentou uma borra depositada no fundo dos tubos aonde foi realizado o ensaio de envelhecimento acelerado. Em função disto, não foi possível extrair os compostos furânicos das amostras para obtenção de resultados confiáveis nas condições utilizadas nesse trabalho.

Os ensaios de grau de polimerização foram realizados em todas as amostras de papel Kraft em contato com os óleos e os resultados estão apresentados nas Tabelas 10 e 11 e 12.

Notou-se um decréscimo no GP em função do aumento do tempo e da temperatura de envelhecimento para todos os óleos. A aditivação dos óleos OV-1, OV-2 e OV-3 (Tabela 11) praticamente não influenciou no envelhecimento do papel em comparação aos mesmos óleos sem aditivação (Tabela 10). Nas condições utilizadas neste estudo não foi possível verificar uma diferença no comportamento do papel quando na presença de OMI em comparação aos demais óleos vegetais.

Tabela 10: Grau de polimerização para o papel Kraft isolante em função do tempo de envelhecimento, a 95 °C para os óleos OV-1, OV-2 E OV-3 não aditivados.

Tempo (h)	Grau de Polimerização		
	OV-1	OV-2	OV-3
6	1013	1133	886
21	1058	979	959
30	848	1070	1031
45	816	960	1120
54	770	1097	1054
69	729	1051	1092
78	819	928	947
93	786	900	729
102	746	852	841

Tabela 11: Grau de polimerização para o papel Kraft isolante em função do tempo de envelhecimento, a 95 °C para os óleos OV-1, OV-2 E OV-3 aditivados e demais fluidos isolantes comerciais .

Tempo (h)	Grau de Polimerização					
	OV-1	OV-2	OV-3	OVI-A	OVI-B	OMI
6	975	1153	855	1042	965	1194
21	1084	1021	1114	931	904	1073
30	1028	771	1176	1174	883	995
45	957	778	987	1008	930	917
54	1047	825	787	1002	1010	880
69	870	737	610	1114	962	929
78	1017	1219	966	917	637	820
93	826	1021	590	594	506	788
102	707	813	758	894	547	835

Tabela 12: Grau de polimerização para o papel Kraft isolante em função do tempo de envelhecimento, a 140 °C para os óleos OV-1, OV-2 E OV-3 aditivados e demais fluidos isolantes comerciais .

Tempo (h)	Grau de Polimerização					
	OV-1	OV-2	OV-3	OVI-A	OVI-B	OMI
72	291	552	370	456	654	468
144	237	202	294	143	464	401
216	479	280	395	375	294	254
312	NR	340	403	364	468	239

NR =não realizado

Segundo RAPP e colaboradores, o ENVIROTEMP®FR3™ é bem menos agressivo que o OMI para o papel Kraft isolante. (RAPP, McSHANE, CORKRAN, *et al.* 2002). Estes autores realizaram um envelhecimento a temperatura de 150 °C, por 4000 h, em tubos selados e concluíram que o papel Kraft degrada mais lentamente

na presença de OVI em comparação ao OMI (Tabela 13). Porém, os valores de GP obtidos por estes autores, tanto para o OMI como para o OVI, após 500 h de envelhecimento indicaram um papel em final de vida útil. O valor do GP para um papel novo está na faixa de 1000 a 1400 diminuindo para valores de 250 a 400 com o tempo de envelhecimento, o que representa uma perda de, aproximadamente, metade da sua resistência mecânica inicial (DARVENIZA, HILL, LE & SAHA, 1991). Assim, para avaliar se o papel Kraft realmente degrada menos na presença de OVI, RAPP e colaboradores deveriam ter analisado o GP em intervalos de tempo inferiores a 500 h (TULIO, 2008). No boletim 04003 da Cooper Power Systems (2004) estão apresentados dados que mostraram que o ENVIROTEMP®FR3™ é bem menos agressivo que o OMI para o papel Kraft, sendo que o envelhecimento foi realizado a temperatura de 170 °C, por 3002 h, em tubos selados.

Tabela 13: GP do papel Kraft isolante envelhecido em OMI e OVI (OVI-A).

Tempo de envelhecimento (h)	GP do papel Kraft envelhecido em	
	OMI	ENVIROTEMP® FR3™
0	1119	1225
500	217	380
1000	110	320
2000	75	306
4000	12	274

Fonte: Adaptado do Boletim 04003 da Cooper Power Systems, 2004.

4.5 AVALIAÇÃO DA FORMAÇÃO DE GASES DISSOLVIDOS

Na Tabela 14, estão apresentados os coeficientes de solubilidade de Ostwald determinados em laboratório. Estes valores serviram de base para o cálculo da concentração dos gases após os óleos serem submetidos a esforços elétricos e térmicos.

Tabela 14: Coeficientes de Solubilidade de Ostwald.

Gás dissolvido	Coeficiente de Solubilidade de Ostwald para os Óleos					
	OV-1	OV-2	OV-3	OVI-B	OVI-A	OMI
Hidrogênio	0,05	0,047	0,0465	0,054	0,05	0,0558
Oxigênio	0,15	0,097	0,105	0,1	0,15	0,179
Nitrogênio	0,07	0,059	0,0745	0,071	0,07	0,0968
Metano	0,3	0,23	0,27	0,305	0,3	0,438
CO	0,09	0,079	0,105	0,11	0,09	0,133
CO ₂	1,33	0,92	1,025	1,19	1,33	1,17
Etileno	1,19	1,18	1,43	1,303	1,19	1,76
Etano	1,45	1,16	1,425	1,374	1,45	2,59
Acetileno	1,63	1,2	1,23	1,52	1,63	1,22

As Tabelas 15 e 16 apresentam os resultados de gases dissolvidos obtidos após submissão dos óleos isolantes aos esforços elétricos e térmicos, respectivamente.

Tabela 15: Concentração de gases dissolvidos (ppm) para os óleos após submissão dos mesmos ao esforço elétrico.

Óleo	Número de descargas disruptivas aplicadas	Concentração de gases dissolvidos (ppm)								
		H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂
OVI-1	0	nd	16547	63490	nd	9	684	nd	nd	nd
OVI-2		20	7250	45199	nd	29	553	nd	nd	nd
OVI-3		25	3712	43395	nd	50	763	nd	nd	nd
OVI-A		nd	16547	63490	nd	9	684	nd	nd	nd
OVI-B		5	1983	42693	nd	61	863	2	1	nd
OMI		nd	37255	75446	nd	nd	526	nd	nd	nd
OVI-1	15	44	9843	54512	3	23	862	7	nd	75
OVI-2		17	7749	31151	1	18	323	2	nd	18
OVI-3		40	9714	35202	1	26	475	5	nd	49
OVI-A		44	9843	54512	3	23	862	7	nd	75
OVI-B		30	6491	32026	1	44	470	5	1	50
OMI		62	36767	71977	8	nd	478	16	nd	122
OVI-1	45	61	10550	57115	4	31	888	16	1	186
OVI-2		38	9411	36971	3	27	423	8	0	89
OVI-3		75	13154	47373	4	53	703	22	0	267
OVI-A		61	10550	57115	4	31	888	16	1	186
OVI-B		49	8120	37999	3	66	587	10	0	82
OMI		103	37254	71811	13	nd	492	25	nd	200

Tabela 15 (Continuação): Concentração de gases dissolvidos (ppm) para os óleos após submissão dos mesmos ao esforço elétrico.

Óleo	Número de descargas disruptivas aplicadas	Concentração de gases dissolvidos (ppm)								
		H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂
OVI-1	75	69	9517	57719	6	44	848	14	1	158
OVI-2		48	7593	33580	3	38	402	12	0	117
OVI-3		69	10479	38515	4	38	581	20	1	171
OVI-A		69	9517	57719	6	44	848	14	1	158
OVI-B		45	8897	42480	3	68	626	13	1	123
OMI		115	36146	74719	20	nd	503	36	2	257
OVI-1	105	52	9739	54293	5	32	800	7	1	150
OVI-2		21	9307	39030	1	21	247	4	0	52
OVI-3		58	9412	40475	3	43	584	13	0	123
OVI-A		52	9739	54293	5	32	800	7	1	150
OVI-B		50	8350	43562	4	95	635	15	0	145
OMI		117	34934	70919	22	nd	524	45	4	325

nd = não detectável

Para os OVIs submetidos aos esforços elétricos (Tabela 15), observou-se a geração dos gases H₂, CH₄, C₂H₄ e C₂H₂. O teor de gases H₂, CH₄, C₂H₄ e C₂H₂ depois de formados se manteve praticamente constante do longo do tempo de ensaio. O teor do gás C₂H₂ foi maior do que o teor dos gases H₂, CH₄ e C₂H₄. O gás C₂H₂ é indicativo de descarga elétrica no óleo isolante.

Tabela 16: Concentração de gases dissolvidos (ppm) para os óleos após submissão dos mesmos ao esforço térmico.

Óleo	Tempo de tratamento térmico (h)	Concentração de gases dissolvidos (ppm)								
		H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂
OVI-1	0	nd	16547	63490	nd	9	684	nd	nd	nd
OVI-2		20	7250	45199	nd	29	553	nd	nd	nd
OVI-3		25	3712	43395	nd	50	763	nd	nd	nd
OVI-A		nd	16547	63490	nd	9	684	nd	nd	nd
OVI-B		5	1983	42693	nd	61	863	2	1	nd
OMI		nd	37255	75446	nd	nd	526	nd	nd	nd
OVI-1	48	91	3500	757888	9	314	1467	4	431	nd
OVI-2		56	2168	49046	8	176	2090	3	25	nd
OVI-3		2	3767	61677	88	330	2129	21	108	nd
OVI-A		91	3500	757888	9	314	1467	4	431	nd
OVI-B		38	2133	70824	15	289	3526	10	493	nd
OMI		78	45730	83943	154	376	1456	5	16	nd
OVI-1	120	158	5673	82077	32	738	3859	10	592	nd
OVI-2		11	2333	47550	6	152	2840	6	27	nd
OVI-3		3	3279	76181	103	507	4025	40	222	nd
OVI-A		158	5673	82077	32	738	3859	10	592	nd
OVI-B		31	3289	76496	14	345	4694	29	653	nd
OMI		77	37260	86325	176	694	2060	8	60	nd
OVI-1	168	88	3983	84193	83	752	3906	16	722	nd
OVI-2		27	2788	55309	4	346	2023	8	25	nd
OVI-3		15	4004	76973	53	734	2741	15	112	nd
OVI-A		88	3983	84193	83	752	3906	16	722	nd
OVI-B		53	3423	75592	10	339	4593	31	666	nd
OMI		87	39320	87502	159	1070	2045	11	79	nd

Tabela 16 (Continuação): Concentração de gases dissolvidos (ppm) para os óleos após submissão dos mesmos ao esforço térmico.

Óleo	Tempo de tratamento térmico (h)	Concentração de gases dissolvidos (ppm)								
OVI-1	168	88	3983	84193	83	752	3906	16	722	nd
OVI-2		27	2788	55309	4	346	2023	8	25	nd
OVI-3		15	4004	76973	53	734	2741	15	112	nd
OVI-A		88	3983	84193	83	752	3906	16	722	nd
OVI-B		53	3423	75592	10	339	4593	31	666	nd
OMI		87	39320	87502	159	1070	2045	11	79	nd
OVI-1	216	95	3683	78670	58	821	4325	15	730	nd
OVI-2		37	8261	76136	4	392	3105	6	30	nd
OVI-3		16	2702	79712	49	873	4922	17	166	nd
OVI-A		95	3683	78670	58	821	4325	15	730	nd
OVI-B		8	3956	79517	10	381	4383	28	596	nd
OMI		84	37430	83373	149	1153	2447	10	91	nd
OVI-1	288	104	3417	76881	51	889	5010	16	754	nd
OVI-2		23	2214	50070	3	645	3961	4	27	nd
OVI-3		150	2865	58318	19	2399	6444	15	168	nd
OVI-A		104	3417	76881	51	889	5010	16	754	nd
OVI-B		32	3926	61307	7	666	3441	10	348	nd
OMI		72	42020	89503	163	805	2908	17	64	nd

nd = não detectável

Para os óleos vegetais submetidos aos esforços térmicos ocorreu a geração dos gases H_2 , CH_4 , CO , CO_2 , C_2H_4 e C_2H_6 . O teor de gases H_2 , CH_4 , e C_2H_4 depois de formados, não apresentaram aumento significativo em função do aumento do stress térmico. Os aumentos mais significativos observados deram-se nos gases CO , CO_2 e C_2H_6 .

4.6 UTILIZAÇÃO DOS DIFERENTES ÓLEOS EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

A Tabela 17 resume os resultados obtidos no ensaio realizado pela fabricante dos transformadores de distribuição. As elevações de temperatura medidas no protótipo ensaiado satisfizeram os limites prescritos na norma ABNT NBR 5365, ou seja, 50 °C para o óleo isolante e 55 °C para a média dos enrolamentos.

Tabela 17: Ensaio de Elevação de Temperatura.

Elevação de Temperatura em Relação ao Ambiente (°C)						
Topo do Óleo	Terminais H1-H2	Terminais H2-H3	Terminais H3-H1	Terminais H1-H2	Terminais X2-X3	Terminais X1-X3
38,3	47,8	48,1	47,3	48,4	48,3	47,9

4.6.1 Ensaio de Medição de Perdas e de Elevação de Temperatura nos Transformadores de Distribuição

Foram realizados ensaios de medição das perdas em vazio e em curto-circuito em seis transformadores de distribuição preenchidos com os diferentes óleos em estudo. Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18: Medição das Perdas em Vazio e em Carga dos Transformadores de Distribuição

Óleo Isolante	Perdas em Vazio (W)	Corrente de Excitação (%)	Perdas em Curto-Circuito 75C (W)	Perdas totais 75C (W)
OV-1	271,3	0,81	1074,0	1345,3
OV-2	288,9	1,12	1082,7	1371,6
OV-3	282,7	0,80	1084,5	1367,2
OVI-A	278,6	0,98	1091,8	1370,4
OVI-B	294,6	1,22	1096,5	1391,1
OMI	282,3	1,22	1088,6	1370,9

Os seis transformadores isolados com os diferentes óleos também foram submetidos ao ensaio de elevação de temperatura normalizado. Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19: Ensaio de Elevação de Temperatura dos Transformadores de Distribuição.

Óleo Isolante	Topo do Óleo	Elevação de Temperatura em Relação ao Ambiente (°C)					
		Terminais H1 H2	Terminais H2 H3	Terminais H3 H1	Terminais X1 X0	Terminais X2 X0	Terminais X3 X0
OV-1	40,1	46,8	46,8	47,3	48,	49,3	46,3
OV-2	42,3	48,9	48,3	48,3	49,1	48,2	48,9
OV-3	40,0	46,7	47,0	46,2	46,9	48,4	47,5
OVI-A	39,2	47,9	48,6	48,9	47,2	47,9	48,4
OVI-B	43,4	47,4	48,1	48,0	47,5	48,4	48,1
OMI	39,7	46,2	44,4	46,6	45,0	45,4	44,4

Pode-se observar que todos os transformadores de distribuição ensaiados apresentaram elevação de temperatura (55° C) do óleo e dos enrolamentos inferior ao estabelecido na norma ABNT NBR 5440 de 1997.

4.6.2 Medição de Resistência de Isolamento

Foi medida a resistência de isolamento dos seis transformadores de distribuição. Os transformadores enchidos com OV-1, OVI-A e OVI-B, tiveram as resistências de isolamento medidas até 3 minutos, sendo possível somente definir o índice DAR (Relação de Absorção = R_{1min}/R_{15s}). Os transformadores enchidos com os óleos OV-2, OV-3 e OMI tiveram suas resistências de isolamento medidas até 10 minutos, sendo possível a definição dos índices DAR e PI (Índice de Polarização = R_{10min}/R_{1min}).

Os transformadores de distribuição ensaiados apresentaram índices que poderiam ser classificados como isolamento questionável. No entanto, deve-se

observar que os limites foram definidos para transformadores de maior porte. A norma IEEE 62-1995 estabelece que para transformadores de menor porte, IP próximo de 1 é adequado. Portanto, os resultados obtidos foram satisfatórios para todos os equipamentos ensaiados.

4.6.3 Medição de Tensão de Rádio Interferência

Todos os transformadores de distribuição apresentaram valores abaixo do limite especificado de tensão de rádio interferência (250 μ V, para classe 15 kV) pela norma ABNT NBR 5440 de 1997.

4.6.4 Medição do Fator de Potência do Isolamento

Todos os transformadores apresentaram fator de potência inferior a 2%, portanto estes transformadores apresentam condição adequada de isolamento.

4.6.5 Ensaio de Impulso Atmosférico

Estão representados nos oscilogramas pelas curvas da corrente medida, em cor vermelha, e da tensão aplicada aos terminais do enrolamento série e comum, na cor azul. Têm-se três impulsos com valor reduzido e especificado representados para a corrente e a tensão. No eixo das ordenadas está a representação da tensão e da corrente normalizadas, em porcentagem da amplitude das ondas aplicadas. No eixo das abscissas tem-se a representação do tempo em μ s, sendo que cada divisão representa 10 μ s.

Os impulsos com ondas cortadas servem para verificação da isolação das espiras iniciais de cada enrolamento. Estão representadas no oscilograma pelas

curvas de tensão medida, na cor verde. Têm-se três impulsos com valor reduzido e especificado.

Todas as ondas plenas e cortadas, reduzidas e com valor especificado estão sobrepostas propositalmente para identificar diferenças entre os oscilogramas de mesmo tipo. A não ocorrência de diferença significa ausência de falha.

Não foram observadas descargas disruptivas internas ou evidências de defeito no transformador preenchido com óleo OV-1, conforme mostram os oscilogramas das Figuras 28(a), 28(b) e 28(c), respectivamente para o ensaio aplicado aos terminais H1, H2 e H3 do transformador.

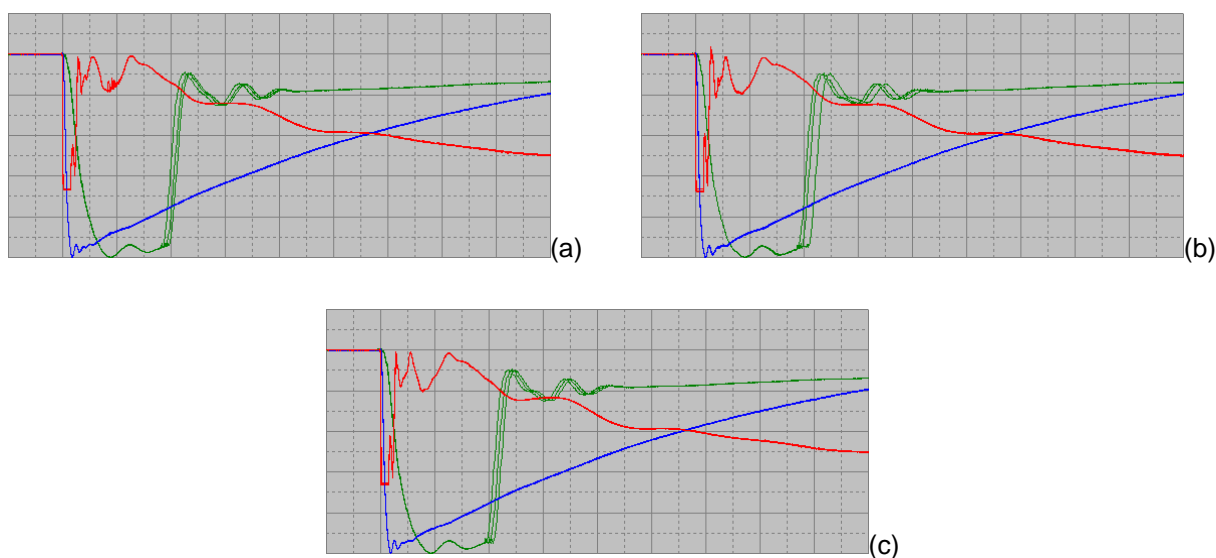


Figura 28: Representação dos oscilogramas para as curvas da corrente (—), da tensão aplicada (—) e de tensão medida (—), para o transformador 75 kVA, preenchido com óleo OV-1 aditivado. (a) Terminal H1; (b) Terminal H2 e (c) Terminal H3.

Para o transformador preenchido com o óleo OV-2 não foram observadas descargas disruptivas internas, conforme mostrado nos oscilogramas da Figura 29. Mas no oscilograma da Figura 29(a) do terminal H1, observou-se um pequeno indício de falha incipiente.

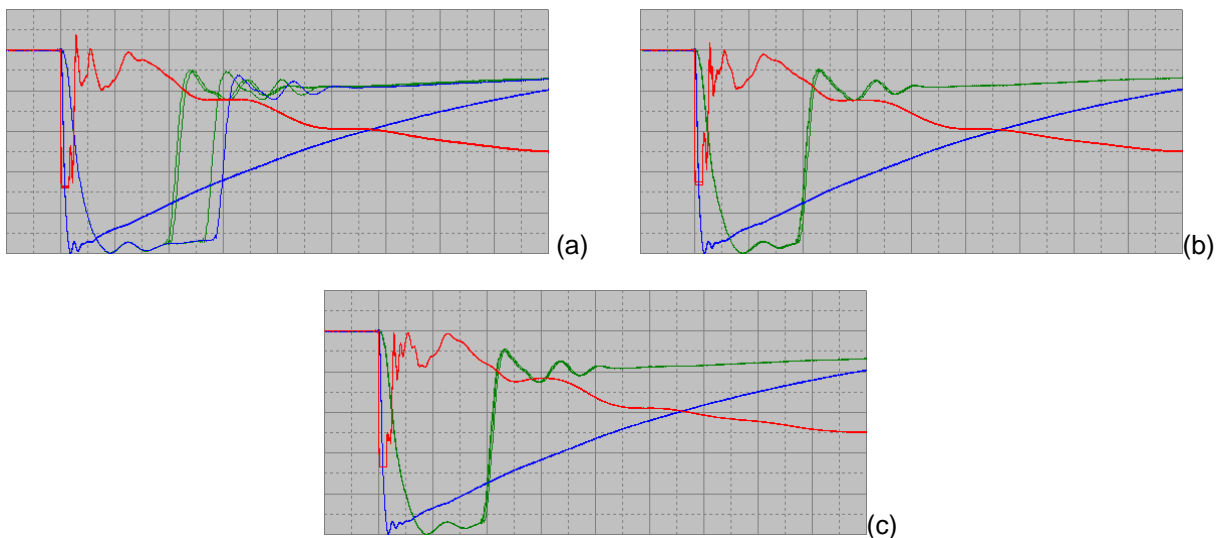


Figura 29: Representação dos oscilogramas para as curvas da corrente (—), da tensão aplicada (—) e de tensão medida (—), para o transformador 75 kVA, preenchido com óleo OV-2 aditivado como fluido isolante. (a) Terminal H1; (b) Terminal H2 e (c) Terminal H3.

Não foram observadas descargas disruptivas durante o ensaio para o transformador preenchido com OV-3, mas os oscilogramas das Figuras 30(a), 30(b) e 30(c) apresentam pequenos indícios de falhas incipientes para os ensaios aplicados ao terminais H1, H2 e H3.

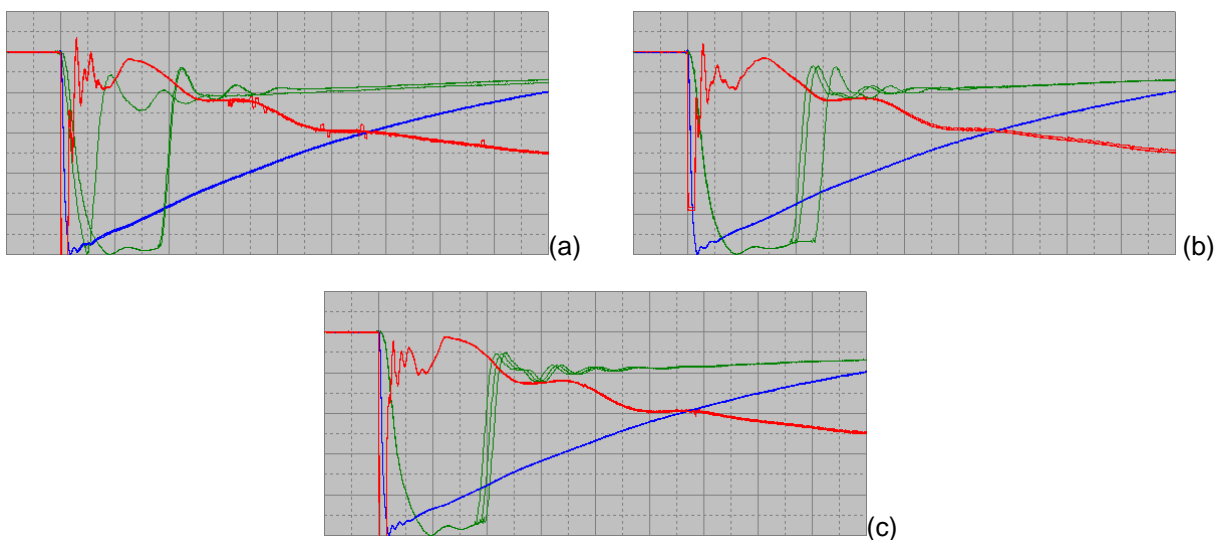


Figura 30: Representação dos oscilogramas para as curvas da corrente (—), da tensão aplicada (—) e de tensão medida (—), para o transformador 75 kVA, preenchido com óleo OV-3 aditivado como fluido isolante. (a) Terminal H1; (b) Terminal H2 e (c) Terminal H3.

Não foram observadas descargas disruptivas internas ou evidências de defeito nos transformadores isolados com os OVIs comerciais, OVI-A (Figura 31) e OVI-B (Figura 32), e com OMI (Figura 33).

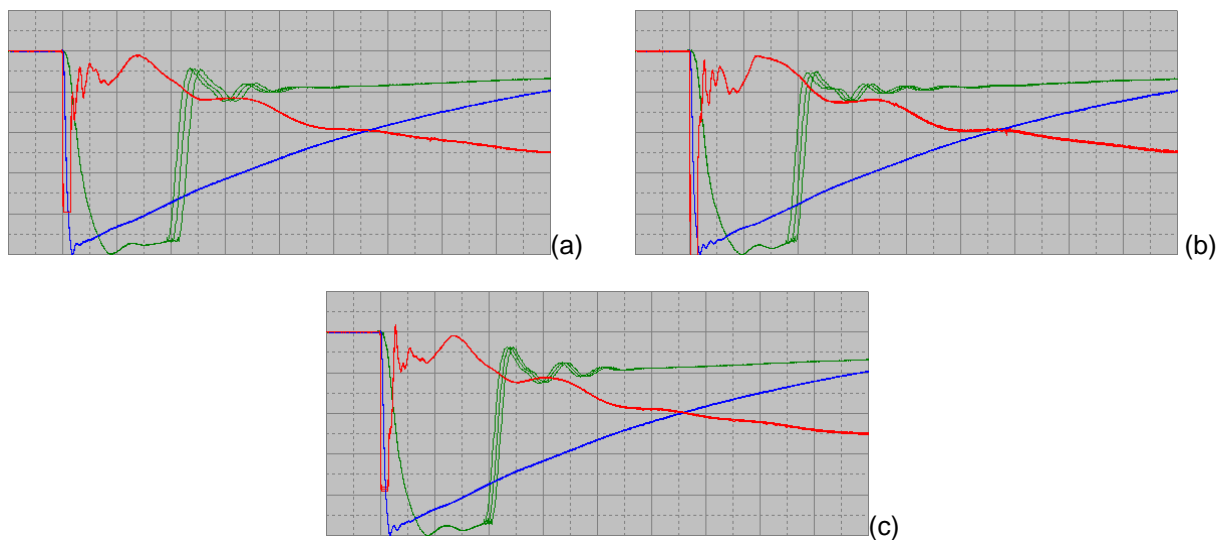


Figura 31: Representação dos oscilogramas para as curvas da corrente (—), da tensão aplicada (—) e de tensão medida (—), para o transformador 75 kVA, preenchido com o óleo OVI-A como fluido isolante. (a) Terminal H1; (b) Terminal H2 e (c) Terminal H3.

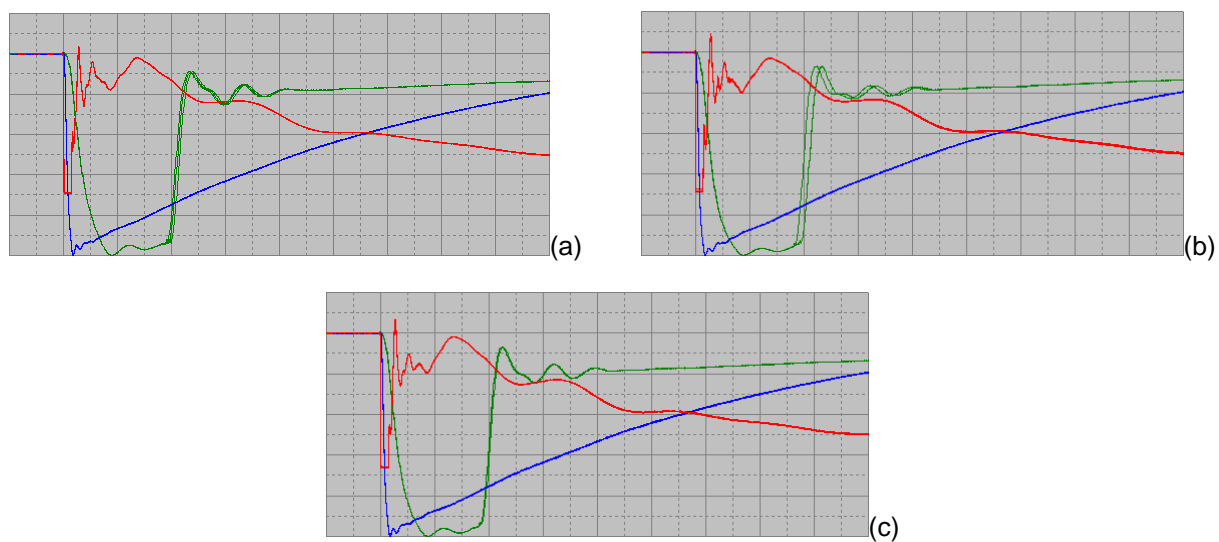


Figura 32: Representação dos oscilogramas para as curvas da corrente (—), da tensão aplicada (—) e de tensão medida (—), para o transformador 75 kVA, preenchido com óleo OVI-B como fluido isolante. (a) Terminal H1; (b) Terminal H2 e (c) Terminal H3

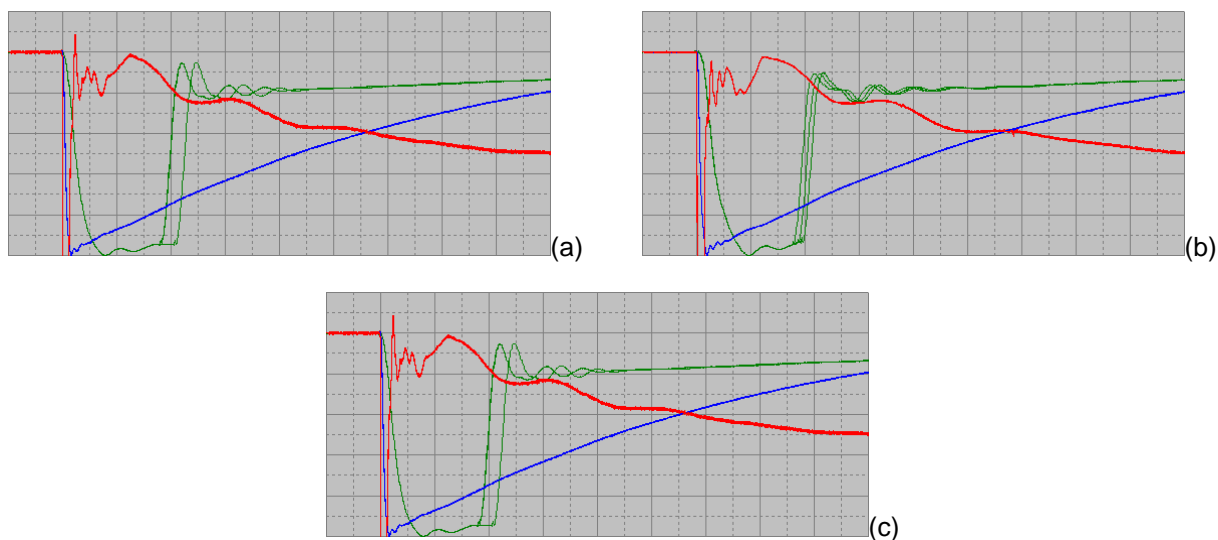


Figura 33: Representação dos oscilogramas para as curvas da corrente (—), da tensão aplicada (—) e de tensão medida (—), para o transformador 75 kVA, preenchido com OMI como fluido isolante. (a) Terminal H1; (b) Terminal H2 e (c) Terminal H3.

4.6.6 Ensaio de Tensão Aplicada

Não se observou nenhuma evidência de defeito ou descarga disruptiva interna nos ensaios aplicados aos seis transformadores de distribuição em avaliação.

4.6.7 Ensaio de Tensão Induzida

Não se observou nenhuma evidência de defeito ou descarga disruptiva interna nos ensaios aplicados aos seis transformadores de distribuição em avaliação neste projeto.

4.7 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ÓLEO SOBRE A SUPORTABILIDADE DIELÉTRICA DO TRANSFORMADOR

Não houve variação significativa de gases dissolvidos nos ensaios realizados antes (Tabela 20) e após (Tabela 21) os ensaios elétricos nos seis óleos em questão.

Tabela 20: Concentração de gases dissolvidos (ppm) para os óleos antes dos ensaios elétricos.

Gases Dissolvidos	Concentração de gases dissolvidos (ppm)					
	OV-1	OV-2	OV-3	OVI-A	OVI-B	OMI
Hidrogênio	5	9	24	19	2	0
Oxigênio	2455	2040	2481	1692	2627	25542
Nitrogênio	35544	36572	38825	43873	43107	56174
Metano	0	0	3	0	1	0
CO	59	22	37	67	97	6
CO ₂	453	413	924	664	640	273
Etileno	0	0	0	0	5	0
Etano	0	0	7	39	3	0
Acetileno	0	0	0	0	2	0
Total Gases Combustíveis	64	31	71	125	110	6
Total Gases	38516	39056	42301	46354	46484	81995

Tabela 21: Concentração de gases dissolvidos (ppm) para os óleos após o ensaio elétrico.

Gases Dissolvidos	Concentração de gases dissolvidos (ppm)					
	OV-1	OV-2	OV-3	OVI-A	OVI-B	OMI
Hidrogênio	4	14	15	9	17	0
Oxigênio	7611	1275	1986	1610	11851	23077
Nitrogênio	42745	32131	39575	25241	38696	50410
Metano	0	1	2	0	0	0
CO	60	21	37	23	22	6
CO ₂	428	360	759	368	612	241
Etileno	0	0	0	0	4	0
Etano	0	0	6	1	1	0
Acetileno	0	0	1	0	2	0
Total Gases Combustíveis	4	36	61	33	46	6
Total Gases	7611	33802	42381	27252	51205	73734

5. CONCLUSÕES

Os resultados de caracterização, realizados com base na norma ABNT NBR 15422 referente à especificação de OVI novo para equipamentos elétricos, indicaram, dentre os óleos vegetais estudados, o óleo OV-2 como potencial matéria prima para produção de OVI por apresentar somente valor de teor de água fora dos limites estipulados, fato este facilmente resolvido com um procedimento anterior de secagem.

A adição do aditivo antioxidante AD-4 não resultou em melhoria significativa no desempenho dos óleos vegetais testados frente aos ensaios de envelhecimento acelerado, apesar do período de indução desses óleos aditivados ter sido semelhante ao do OVI comercial OVI-B.

Os resultados dos ensaios elétricos mostraram que os óleos vegetais OV-2 e OV-3 não são indicados para uso como fluido isolante porque suas características não atenderam as exigências elétricas solicitadas durante os ensaios de laboratório, já que apresentaram falhas de isolamento. Para que esses óleos possam ser utilizados como fluido isolante, devem ser processados adequadamente com o objetivo de ajustar suas características às exigências dos equipamentos elétricos.

O óleo OV-1 passou nos ensaios elétricos mas não atendeu aos requisitos mínimos estipulados na norma ABNT NBR 15422, como Índice de Neutralização e Teor de Água

O atendimento a norma ABNT NBR 15422 é necessário, mas não suficiente para garantir a aplicabilidade de um óleo vegetal como fluido isolante em transformadores, seja de distribuição ou de potência.

5.1. SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DOS ESTUDOS

Visando a continuidade dos estudos referentes à utilização de OVI em equipamentos elétricos, propõe-se a realização das seguintes pesquisas:

- Ensaios adicionais elétricos, dielétricos e de compatibilidade com materiais precisam ser conduzidos para comprovar a aplicabilidade e o desempenho desses óleos como fluidos isolantes.
- Avaliação da extensão da vida útil do papel Kraft isolante na presença de OVIs.
- Análise de misturas de óleos vegetais de diferentes matérias primas como potenciais fluidos isolantes.
- Teor de aditivo ideal para melhoria do tempo de oxidação dos óleos vegetais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS

ANP Resolução nº 36, de 5 de dezembro de 2008. Especificações dos óleos minerais isolantes tipo A e tipo B, de origem nacional ou importada, comercializados em todo o território nacional, consoante às disposições contidas no Regulamento Técnico ANP nº 4/2008, parte integrante desta Resolução. Disponível em: <[http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2008/dezembro/ranp%2036%20-%202008.xml?f=templates\\$fn=document-frame.htm](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2008/dezembro/ranp%2036%20-%202008.xml?f=templates$fn=document-frame.htm)> Acessado em: 07/05/2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2140:** Standard Practice for Calculating Carbon-Type Composition of Insulating Oils of Petroleum Origin. 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2780:** Standard Test Method for Solubility of Fixed Gases in Liquids. 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3300:** Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin under Impulse Conditions. 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3612.** Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography. 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5837**: Standard Test Method for Furanic Compounds in Electrical Insulating Liquids by High-Performance Liquid Chromatography (HPLC). 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6871**: Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus. 2003.

ALSBERG, C. L.; TAYLOR, A. E.; **The fats and oils, a general view**. California: Food Research Institute Stanford University, 1928.

ARANTES, J. G. **Diagnóstico de falhas em transformadores de potência pela análise de gases dissolvidos e óleo isolante através de redes neurais**. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5356-3**: Transformadores de potência – Parte 3: Níveis de isolamento, ensaios dielétricos e espaçamentos externos em ar (2º Projeto de Revisão). 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5440**: Transformadores para Redes aéreas de Distribuição. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5779**: Óleos minerais isolantes - Determinação qualitativa de cloretos e sulfatos inorgânicos. 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6869**: Líquidos isolantes elétricos - Determinação da rigidez dielétrica (eletrodos de disco). 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7070**: Guia para amostragem de gases e óleo em transformadores e análise dos gases livres e dissolvidos. 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7148**: Petróleo e produtos de petróleo - Determinação da massa específica, densidade relativa e °API - Método do densímetro. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8148**: Papéis e papelões celulósicos, novos e envelhecidos, para fins elétricos - Medida do grau de polimerização viscosimétrico médio - Método de ensaio. 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10441**: Produtos de petróleo - Líquidos transparentes e opacos - Determinação da viscosidade cinemática e cálculo da viscosidade dinâmica. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10504**: Óleo mineral isolante - Determinação da estabilidade à oxidação. 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10505**: Óleo mineral isolante - Determinação de enxofre corrosivo. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10710/B**: Líquido isolante elétrico - Determinação do teor de água. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11341:**

Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11349:** Produto

de petróleo - Determinação do ponto de fluidez. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12133:** Líquidos

isolantes elétricos - Determinação de fator de perdas dielétricas e da permissividade relativa (constante dielétrica). 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12134 A:** Óleo

mineral isolante - Determinação do teor de 2,6-di-terciário-butil paracresol. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13882:** Líquidos

isolantes elétricos - Determinação do teor de bifenilas policloradas (PCB). 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14248:**

Produtos de petróleo - Determinação do número de acidez e de basicidade - Método do indicador. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14483:**

Produtos de petróleo - Determinação da cor - Método do colorímetro ASTM. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15422:** Óleos

vegetais isolantes para equipamentos elétricos – Especificação. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 60156:**

Líquidos isolantes - Determinação da rigidez dielétrica à frequência industrial - Método de ensaio. 2004.

BATISTA, D. A. **Desenvolvimento de Metodologia Colorimétrica para Dosagem de Compostos Furânicos em Óleo Mineral Isolante**. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais. Universidade Federal do Paraná. 2005, 71 p.

BATISTA, D. A., PATRIARCA, P. A., TRINDADE, E. M., WILHELM, H. M. **Colorimetric methodology for monitoring the cellulose insulating paper degradation in electrical equipments filled with mineral oil**. Cellulose, 15:497-505, 2008.

BAILEY, A. E.; **Bailey's Industrial Oil and Fat Products**, 5th ed., John Wiley: New York, 1996, vol. 3.

BOGNAR, A.; KALOCSAI, L.; CSPES, G.; NEMETH, E.; SCHMIDT, G. **Diagnostic tests of high voltage oil: paper insulating system using DC dielectrometrics**. Proc. 33rd Intern. Conf. Large High Voltage Electric System, CIGRE, France: v.2, 1990, p. 15-33.

BRITISH STANDARDS. **BS EN 14112:2003**. Fat and oil derivatives. Fatty acid methyl esters (FAME). Determination of oxidation stability (accelerated oxidation test). 2003.

CELESC. **Centrais Elétricas de Santa Catarina**. Disponível em <<http://www.celesc.com.br>>. Acessado em em 29 de maio de 2008.

CEMIG. **Centrais Elétricas de Minas Gerais.** Disponível em <<http://www.cemig.com.br>>. Acessado em 29 de maio de 2008.

CHANG, Y, Z. D.; GERPEN, V. H. J.; LEE, I.; JOHNSON, A, L.; HAMMOND, G. E.; MARLEY, J. S. **Fuel properties and emission of soybean oil esters as diesel fuel.** J. Am. Oil Chem. Soc, v.73, nº. 11, 1996, p. 1549-1555.

CLAIBORNE, C. C., CHERRY, D. B. **A status update on the use of natural ester (vegetable oil) dielectric fluids in transformers.** Doble, 2006.

CLARK, F. M. **Insulating materials for design and engineering practice.** New York: John Wiley and Sons, 1962, 393 p.

COOPER POWER SYSTEMS. **BULLETIN 04003. Insulating paper aging comparison Envirotemp® FR3™ fluid vs. mineral oil.** 2004.

COPEL. Companhia Paranaense de Energia. **Copel usa transformadores isolados com óleo vegetal.** Disponível em <<http://copel.gov.br>>. Acessado em 27 de julho de 2006.

COPEL. **Companhia Paranaense de Energia.** Disponível em <<http://copel.gov.br>>. Acessado em 22 de maio de 2009.

DARVENIZA. M.; HILL, D. J. T.; LE, T. T.; SAHA, T. K. Studies of the condition of insulation in aged power transformers, part 2 – fundamental electrical and chemical considerations. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROPERTIES AND APPLICATIONS OF DIELECTRIC MATERIALS**, 3., 1991, Tokyo, Japan. Proceedings IEEE, Tokyo, 1991. p. 1120-1123.

ELETRONORTE. **Centrais elétricas do Norte.** Disponível em <http://www.eletronorte.gov.br>. Acessado em 29 de maio de 2008.

FABRE, J.; PICHON, A. **Deterioration process and products of paper in oil.** CIGRE, Paris, n. 137, 1960.

FCTUC – **Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.** Disponível em: <http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1>. Acessado em julho de 2009.

FERNANDES, P. O. Apostila: **Manutenção de transformadores através do controle do óleo isolante mineral:** notas de aula do curso de manutenção de transformadores. Westinghouse do Brasil – Divisão de Serviços Industriais. 1988. 17p.

FRANKEL, E. N.; **Prog. Lip. Res.** 1980, 19, 1

GOMES, A. L. **Desenvolvimento e aplicação de espumas uretânicas para a adsorção de bifenilas policloradas em óleo mineral isolante.** Curitiba, 2006. 101 p. Dissertação (Mestrado Profissionalizante - PRODETEC) - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento e Instituto de Engenharia do Paraná.

GRANATO, R. C.; LEVY, N. M.; TULIO, L. Apostila: **Manutenção de transformadores baseada em ensaios físico-químicos e cromatográficos no sistema isolante.** Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, agosto, 2001, 25p.

HALSTEAD W.D., **Transformer Fault Diagnosis by Oil Decomposition Product Analysis**, Central Electricity Research Laboratories Note, No. RD/L/N, 66/70, 1970.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 247**: Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor and DC. resistivity of insulating oils.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 450**: Measurement of the Average Viscosimetric Degree of Polymerization of New and Aged Electrical Papers. 1974.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC **IEEE 62**: Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors. 1995.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC. **IEEE - PC57.147™/D11**. Guide for acceptance and maintenance of natural ester fluids in transformers. (Unapproved IEEE standards draft). 2004. 21p.

IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC. **C57.147™. Guide for acceptance and maintenance of natural ester fluids in transformers**. 2008. 31p.

JORGE, N.; GONÇALVES, L. A. G.; **Boletim 32 ABCTA**. Sociedade Brasileira e Ciência e Tecnologia de alimentos, 1998, p.40

KARSAI, K.; KERENYI, D.; KISS, L. **Large power transformer**. New York: Elsevier Company, 1987.

- KUMARATHASAN, R.; RAJKUMAR, A. B.; HUNTER, N. R. **Autoxidation and yellowing of methyl linolenate**. Prog. Lipid Research. v.31, n.2, p. 109-126, 1992.
- LEVCHIK, K.; SCHIEIRS, J.; CAMINO, G.; TUMIATTI, W.; AVIDANO, M. **Depolymerization process in the thermal degradation of cellulosic paper insulation in electrical transformers**. Polymer Degradation and Stability, v. 61, 1998, p. 507-511.
- LEVY, N. M.; RIBEIRO, L. H.; NACHVALGER, E. E.; SILVA, R. R. **Determinação de carboidratos em óleo mineral isolante originados da degradação da isolação celulósica, através do método espectrofotométrico**. Anais do IV Seminário de Materiais no Setor elétrico, Curitiba: Copel/Lac, 1994. P. 349-354.
- LEWAND, L.R. **Natural ester dielectric liquids**. Chemist's Perspective, Neta World, 2004.
- LIPSHTEIN, R. A.; SHAKHNOVICH, M. I. **Transformer oil**. 2. ed. Jerusalem, Israel: 1970. 275p.
- McSHANE, C. P. **Vegetable-oil-based dielectric coolants**. IEEE Applications Magazine, June 2002.
- McSHANE, C. P., LUKSICH, J., RAPP, K. J. **Retrofilling aging transformers with natural ester based dielectric coolant for safety and life extension**. IEEE – IAS/PCA Cement Industry Conference, Dallas, TX. 1 a 8 de maio de 2003.

- MILASH, M. **Manutenção de transformadores em líquido isolante**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1984. 354 p.
- MORAIS, R. M. N. de. **Estudo do envelhecimento térmico do papel isolante elétrico**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1990. p. 152.
- MORAIS, S. A. L. **Análise da madeira de *Pinus oocarpa* parte I – estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis**; Viçosa: Revista Árvore vol.29 nº.3. 2005.
- MORETTO, E.; FETT, R. **Tecnologia de óleos e gorduras vegetais**. São Paulo: Varela Editora e Livraria Ltda, 1998. 150 p.
- MEYERS, S. D.; KELLY, J.J.; PARRISH, R.H. **A guide to transformer maintenance**. Ohio: Transformer Maintenance Institute, 1982.
- NYNÄS NAPHTHENICS AB. **Transformer oil handbook**. 1 ed. Sweden: Linderöths in Vingaker, 2004, 223 p.
- NUNES JUNIOR, J. L.; GALDEANO, C.A.; CAMPOS, E. A. **Secagem da parte ativa de transformadores de potência, energizados, utilizando filtros absorvedores de água**. In: Seminário Interno de Manutenção de Subestações da CTEEP e EPTE, 2000. Disponível em <[http:// www.avimach.com.br/eletrica/epete.html](http://www.avimach.com.br/eletrica/epete.html)> . Acessado em 10 de março de 2008.

- OOMMEN, T.V. **Vegetable oils for liquid-filled transformers.** IEEE Electrical Insulation Magazine, jan, 6-11, 2002.
- PABLO, A.; PAHLAVANPOUR, B. **Furanic Compounds analysis: a tool for predeictive maintenance of oil filled electrical equipment.** Electra, n. 175, p. 9-31, 1997.
- PIRARY. **O mundo do papel.** Companhia Industrial de papel. Rio de Janeiro: 1986.
- PRANKL, X.; SCHINDLBAUER, X. **Oxidation stability of fatty acid methyl esters.**
In: European Conference on Biomass for Energy and Industry, 10, 1998, Würzburg, Germany. Anais. Würzburg: BLT, 1998. p. 1-5.
- RAAP, J. L. K, McSHANE, C. P., CORKRAN, J. L., GAUGER, G.A., LUKSICH, J. **Aging of paper insulation in natural ester dielectric fluid.** IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition. Atlanta, nov, 2001. 5p.
- RAAP, J. L. K., McSHANE, C. P., CORKRAN, J. L., GAUGER, G. A., LUKSICH, J. **Aging of paper insulation in natural ester dielectric fluid. Proceedings of 14th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL).** Austria, jul, 173-177, 2002.
- RAAP, J. L. K., McSHANE, C. P., LUKSICH, J. **Interaction mechanisms of natural ester dielectric fluid and Kraft paper.** 15th International conference on dielectric liquids, Coimbra, Portugal, Jun, 2005.
- RAMALHO, V. C. & JORGE, N. **Antioxidantes utilizados em óleos, gorduras e alimentos gordurosos.** Quím. Nova vol.29 no.4 São Paulo Jul/Aug. 2006

RAMOS, L. P. **Aspectos técnicos sobre o processo de produção de biodiesel.**

In: SEMINÁRIO PARANAENSE DE BIODIESEL, 1., 2003, Londrina. Anais eletrônicos. Disponível em: <<http://www.tecpar.br/cerbio/Seminario-palestras.htm>>. Acessado em 12 de março de 2008.

SCHIEIRS, J.; CAMINO, G.; AVIDANO, M.; TUMIATTI, W. **Origin of furanic compound in thermal degradation of cellulosic insulating paper.** Journal of applied polymer science, v. 69, 1998. p. 2541-2547

SIEMENS. **Transformadores de Distribuição isolados a óleo.** Disponível em <<http://www.siemens.com.br/templates/produto.aspx?channel=5528&produto=1856>> Acessado em 13/07/2009.

SHOFF, D. H.; STANNET, A. W. **A review of paper aging in power transformers.** IEEE Proceedings. V. 132, n. 5, p. 312-319, 1985.

SIEROTA, A.; RUNGIS, J. **Electrical insulating oils part I: characterization and pre-treatment of new transformer oils.** IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 11, nº 1, p. 8-18, 1995.

SIMIC, M. G.; JAVANOVIC, S. V. **Inactivation of oxygen radicals by dietary phenolic compounds in anticarcinogenesis;** Food Phytochemicals for Cancer Prevention: Washington, 1994, p. 20.

STEBBINS, R. D.; MYERS, D. S.; SHKOLNIK, A. B. **Furanic compounds in dielectric liquid samples: review and update of diagnostics interpretation and estimation of insulating aging.** International conference on properties and applications of dielectrics materials. IEEE Proceedings, Nagoya: 2003 p. 921-926

STOURNAS, S.; LOIS,E.; SERDARI,A. **Effects of fatty acid derivatives on the ignition quality and cold flow of diesel fuel.** J. Am. Oil Chem. Soc. v.72, n.4, p. 436-437, 1995.

TULIO, L. **Estudo do Envelhecimento Acelerado de Óleo Vegetal Isolante em Escala Laboratorial.** Curitiba, 2007. 123 p. Dissertação (Mestrado Profissionalizante - PRODETEC) - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento e Instituto de Engenharia do Paraná.

UHREN, W. **Aplicação de óleo vegetal como meio isolante em equipamentos elétricos, em substituição ao óleo mineral isolante.** Curitiba, 2007. 123 p. Dissertação (Mestrado Profissionalizante - PRODETEC) - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento e Instituto de Engenharia do Paraná.

UNSWORTH, J.; MITCHELL, F. **Degradation of electrical insulating paper monitored with high performance liquid chromatography.** IEEE Transactions on electrical Insulation, v. 25, n. 4, p. 737-746, 1990.

VÁZQUEZ, J. R. **Materiales Electro-tecnicos.** Barcelona: CEAC, 1977.

WEG, **Transformadores de Distribuição.** Disponível em <<http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Energia/Geracao-Transmissao-e-Distribuicao-de-Energia/Transformadores-de-Distribuicao>>. Acessado em 01 de junho de 2009

WILHELM, H. M., GRANATO, R. C., TULIO, L., STOCCO, G. B., RAVAGLIO M. A., BATISTA, D. A., MATTOSO, M., TRINDADE, E. M., UHREN, W., JÚNIOR, S. B. G., ADONIS, N. G. **Aspectos relacionados com a utilização de óleo vegetal isolante no Brasil.** Anais do IV International Workshop on Power Transformer (IV WORKSPOT). Abril 2006, 9p.

WILHELM, H. M., GRANATO, R. C., TULIO, BATISTA, D. A., STOCCO, G. B., SABEC, D., OLIVEIRA, J., UHREN, W., JASINSKI, R., NUNO G. ADONIS, N. G., JÚNIOR, S. B. G. **Desempenho de óleo vegetal isolante frente ao envelhecimento acelerado.** Anais do Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Outubro, 2007.

WILHELM, H. M.; STOCCO, G. B. **Determinação da Estabilidade à Oxidação de Óleos Vegetais Isolantes pelo Método Condutivimétrico.** Relatório Técnico. 2007, 6 p.

WILSON, A. C. M. **Insulating liquids: their uses manufacture and properties.** London: Peter Peregrinus Ltd., 1980. 221p.

YAMAOKA, R. S. **Plantas oleaginosas para produção de biodiesel.** II Workshop da Rede Bionerg. 2007

YUE, W.; ZHUXIAO, H.; JIAXIANG, Z. **Expediting cellulose insulation aging evaluation and life prediction through degree of polymerization mansuremants.** Properties and aplication of Dielectric Materials.1988. p. 328-331.